

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської науково-дослідної роботи

освітній ступінь: магістр

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

спеціалізація _____
(назва спеціалізації)

на тему «Розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та керування економайзером (Е–132) у відпарювання процесного конденсату в виробництві аміаку»

Виконав: студент групи АТП-24дм _____ І.В. Сарніцький
(підпис)

Керівник _____ П.Й. Єлісєєв
(підпис)

Завідувачка кафедри _____ М.Г. Лорія
(підпис)

Рецензент _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка XX сторінок, 29 рисунків, 10 таблиці, 22 джерел посилання. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ВІДПАРЮВАННЯ ПРОЦЕСНОГО КОНДЕНСАТУ, ВИРОБНИЦТВО АМІАКУ, ЕКОНОМАЙЗЕР Е-132, ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, PID-РЕГУЛЮВАННЯ, КАСКАДНЕ КЕРУВАННЯ, FEEDFORWARD-КЕРУВАННЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, КІСУ ТП, SCADA-СИСТЕМА, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Об'єктом дослідження є технологічний процес відпарювання процесного конденсату у виробництві аміаку.

Предмет дослідження: динамічні та теплофізичні властивості економайзера Е-132 та методи автоматичного регулювання температурного режиму процесного конденсату у комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ ТП).

Метою магістерської науково-дослідної роботи є розробка математичної моделі вузла відпарювання процесного конденсату, дослідження його динамічних властивостей та синтез алгоритмів автоматичного керування для комп'ютерно-інтегрованої системи управління економайзером Е-132 з метою підвищення стабільності температурного режиму та зменшення витрат гріючої пари.

Метод дослідження – теоретичний із використанням методів математичного моделювання, аналізу передавальних функцій та перехідних процесів, а також комп'ютерного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink та інтеграції з SCADA-системою.

Під час виконання магістерської роботи було отримано такі результати:

- проведено комплексний аналіз вузла відпарювання процесного конденсату, визначено основні матеріальні потоки, параметри обладнання та характер динамічних процесів;
- розроблено математичну модель економайзера Е-132 та лінеаризовану модель з передавальними функціями, проведено частотний аналіз та дослідження перехідних процесів;
- здійснено синтез PID-, каскадних та feedforward алгоритмів автоматичного регулювання та проведено їх порівняльний аналіз;
- розроблено структури та інтерактивні мнемосхеми КІСУ ТП для контролю температурних, витратних та рівневих параметрів;
- реалізовано алгоритми регулювання на PLC та інтегровано їх із SCADA для динамічного контролю технологічних параметрів;
- підтверджено енергетичну ефективність та економічну доцільність впровадження автоматизованої системи керування, що забезпечує зниження витрат енергоресурсів та експлуатаційних витрат підприємства.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
Розділ 1. Аналіз сучасного стану автоматизації процесів відпарювання процесного конденсату у виробництві аміаку	9
1.1. Технологічний цикл виробництва аміаку.....	9
1.2. Аналіз існуючих систем автоматизації.....	9
1.3. Структурна схема вузла	9
1.4. Технологічна схема вузла	10
1.5. Мнемосхема потоку конденсату	11
1.6. Основні параметри матеріальних потоків.....	11
1.7. Висновки до розділу 1	12
Розділ 2. Аналіз існуючих автоматизованих систем керування та формулювання завдань магістерської роботи.....	12
2.1. Теоретичні основи КІСК.....	12
2.2. Типова архітектура АСК.....	13
2.3. Вимоги до керування вузлом відпарювання	14
2.4. Блок-схема алгоритмів керування.....	15
2.5. Промислові протоколи	16
2.6. Висновки до Розділу 2 та формулювання завдань магістерської роботи.....	17
Розділ 3. Розробка математичних моделей процесу відпарювання	18
3.1. Мета та завдання.....	18
3.2. Диференціальні рівняння та моделювання	18
3.3. Загальний вигляд передавальної функції	19
3.4. Параметри моделей та передавальних функцій.....	20
3.5. Структурні та блок-схеми моделей.....	21
3.6. Підсумкові таблиці та дані для моделювання.....	23
3.7. Висновки до розділу 3.....	25

Розділ 4. Теоретичні дослідження математичних моделей	25
4.1. Аналіз динамічних властивостей об'єкта керування	25
4.1.1. Аналіз стійкості лінеаризованої моделі	26
4.1.2. Аналіз перехідної характеристики об'єкта без регулятора	27
4.1.3. Частотний аналіз лінеаризованої моделі	28
4.1.4. Висновки до підпункту 4.1	28
4.2. Постановка задачі автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату	29
4.3. Вибір структури системи автоматичного керування вузлом відпарювання	30
4.4. Алгоритми керування економайзером Е-132	31
4.5. Синтез та налаштування регуляторів	31
4.6. Моделювання та аналіз перехідних процесів	33
4.6.1. Вхідні дані та параметри моделювання	33
4.6.2. Проведення моделювання	33
4.6.3. Результати моделювання	33
4.6.4. Таблиці результатів	35
4.6.5. Висновки підпункту 4.5	36
4.7. Обґрунтування вибору алгоритмів керування	37
4.8. Висновки до розділу 4	38
Розділ 5. Розробка мнемосхем КІСУ ТП	39
5.1. Мета та завдання розділу	39
5.2. Вимоги до мнемосхем КІСУ ТП	39
5.3. Загальна структура мнемосхем КІСУ ТП	40
5.4. Розробка мнемосхеми вузла відпарювання	41
5.5. Відображення технологічних параметрів та станів обладнання	43
5.6. Система сигналізації та аварійного оповіщення	44
5.7. Ергономічні аспекти та зручність роботи оператора	45
5.8. Висновки до розділу 5	47
Розділ 6. Розробка програмного забезпечення КІСУ ТП у динамічному режимі	47

6.1. Мета та завдання розробки програмного забезпечення.....	47
6.2. Вибір середовищ програмної реалізації	48
6.3. Реалізація алгоритмів автоматичного регулювання.....	50
6.4. Програмна реалізація регуляторів у PLC	51
6.5. Інтеграція моделі з SCADA та реалізація динамічного режиму	52
6.6. Дослідження перехідних процесів	54
6.7. Висновки до розділу 6.....	56
Розділ 7. Аналіз результатів досліджень.....	56
7.1. Мета та завдання аналізу результатів	56
7.2. Аналіз перехідних процесів системи керування.....	57
7.3. Порівняльна оцінка алгоритмів керування	58
7.4. Аналіз енергетичної ефективності	60
7.5. Оцінка експлуатаційних переваг системи	61
7.6. Економічна оцінка впровадження.....	62
Загальні висновки.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

KICY - Комп'ютерно-інтегрована система управління;

ТП - Технологічний процес;

KICK - Комп'ютеризована інформаційно-обчислювальна система керування;

АСК - Автоматизована система керування;

САР – Система автоматичного регулювання;

АЧХ - Амплітудно-частотна характеристика;

ФЧХ - Фазо-частотна характеристика;

PLC - Програмований логічний контролер (Programmable Logic Controller);

SCADA - Система диспетчерського контролю та збору даних (Supervisory Control And Data Acquisition);

PID - Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (Proportional-Integral-Derivative);

E-132 - Економайзер E-132 (теплообмінний апарат вузла відпарювання);

MATLAB/Simulink - Пакет програм для математичного та імітаційного моделювання;

feedforward - Випереджальне керування (алгоритм регулювання);

KPI - Ключовий показник ефективності (Key Performance Indicator);

ВСТУП

Сучасне виробництво аміаку належить до найбільш енергоємних хіміко-технологічних процесів і характеризується складною багатопараметричною взаємодією апаратних, теплотехнічних та керуючих підсистем. Підвищені вимоги до енергоефективності, стабільності технологічних режимів і якості підготовки технологічних потоків зумовлюють необхідність удосконалення систем автоматизації ключових вузлів виробництва [6, 7].

Одним із критичних елементів технологічного циклу є процес відпарювання процесного конденсату, який забезпечує видалення залишкових домішок аміаку та діоксиду вуглецю і формує параметри конденсату, що повертається у виробничий цикл. Ефективність роботи вузла відпарювання безпосередньо впливає на тепловий баланс установки, витрати гріючої пари та стабільність температурних режимів відпарної колони. Несвоєчасне або неточне регулювання температури та витрат процесного конденсату призводить до підвищеного споживання енергоресурсів, зниження ефективності десорбції та зростання експлуатаційних витрат.

На практиці значну роль у процесі відпарювання відіграє економайзер Е-132, який виконує функцію теплообмінного апарата між гріючою парою та процесним конденсатом. Як об'єкт керування економайзер Е-132 характеризується інерційністю, наявністю транспортного запізнення та суттєвим впливом збурень, пов'язаних зі зміною витрат і температур вхідних потоків. Це ускладнює забезпечення стабільного температурного режиму при використанні традиційних локальних систем регулювання.

Сучасні комп'ютерно-інтегровані системи управління (KICU), побудовані на основі програмованих логічних контролерів та SCADA-систем, дозволяють реалізувати багаторівневу архітектуру керування, здійснювати збір і обробку даних у реальному часі, а також впроваджувати комбіновані алгоритми регулювання. Використання математичних моделей об'єкта керування в поєднанні з цифровим моделюванням створює передумови для підвищення точності підтримання температурного режиму, зменшення впливу збурень та оптимізації витрат гріючої пари.

Важливим етапом проєктування ефективної системи автоматичного керування є розробка математичної моделі процесу відпарювання, яка адекватно відображає теплофізичні та динамічні властивості економайзера Е-132. На основі такої моделі можливе проведення частотного аналізу, дослідження перехідних процесів і синтез алгоритмів керування, зокрема PID-, каскадних та feedforward-структур, з урахуванням специфіки об'єкта.

Об'єктом дослідження є технологічний процес відпарювання процесного конденсату у виробництві аміаку.

Предметом дослідження є динамічні та теплотехнічні властивості економайзера Е-132 як об'єкта автоматичного керування, а також методи і алгоритми автоматичного регулювання температурного режиму процесного конденсату в комп'ютерно-інтегрованій системі управління.

У зв'язку з викладеним, актуальність даної магістерської науково-дослідної роботи зумовлена необхідністю розробки та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи контролю і керування процесом відпарювання процесного конденсату з використанням економайзера Е-132, що забезпечує стабільний температурний режим, зниження

енергетичних витрат і підвищення ефективності технологічного процесу у виробництві аміаку.

Метою магістерської науково-дослідної роботи є розробка математичної моделі вузла відпарювання процесного конденсату, дослідження його динамічних властивостей та синтез алгоритмів автоматичного керування для комп'ютерно-інтегрованої системи управління економайзером Е-132 з метою підвищення стабільності температурного режиму та зменшення витрат гріючої пари.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачається розв'язання таких **основних завдань**:

- аналіз сучасного стану автоматизації процесів відпарювання процесного конденсату у виробництві аміаку;
- дослідження технологічних і динамічних характеристик економайзера Е-132 як об'єкта керування;
- розробка математичної моделі процесу теплообміну та лінеаризація рівнянь для подальшого аналізу;
- отримання передавальних функцій і дослідження частотних та перехідних характеристик об'єкта;
- синтез та порівняльний аналіз алгоритмів автоматичного регулювання;
- розробка структурної схеми та імітаційної моделі комп'ютерно-інтегрованої системи управління з використанням SCADA-технологій.

Виконання цих завдань дозволяє отримати **комплексне науково-технічне обґрунтування та практичну реалізацію автоматизованого керування процесом відпарювання**, що відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації та вимогам до виконання магістерських робіт у закладах вищої освіти технічного профілю.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку та уточненні підходів до математичного моделювання і автоматичного керування процесом відпарювання процесного конденсату у виробництві аміаку з використанням економайзера Е-132 як об'єкта керування. У роботі удосконалено математичну модель процесу теплообміну, отримано лінеаризовану модель у вигляді передавальних функцій з урахуванням транспортного запізнення. Вперше для досліджуваного вузла проведено порівняльний аналіз ефективності PID-, каскадного та feedforward-керування, а також обґрунтовано доцільність застосування комбінованої структури регулювання температурного режиму процесного конденсату. Розроблено імітаційну модель комп'ютерно-інтегрованої системи управління, що поєднує математичну модель об'єкта з алгоритмами автоматичного регулювання та елементами SCADA-системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої математичної та імітаційної моделей при проєктуванні, модернізації та експлуатації систем автоматичного керування процесом відпарювання процесного конденсату. Отримані результати можуть бути застосовані для вибору структури системи керування, налаштування параметрів регуляторів, оцінювання якості регулювання та прогнозування впливу зовнішніх збурень. Імітаційна модель КІСУ може використовуватися як інструмент попередньої перевірки алгоритмів керування, навчально-методичний засіб та основа для подальшої модернізації систем автоматизації на підприємствах хімічної промисловості.

Розділ 1. Аналіз сучасного стану автоматизації процесів відпарювання процесного конденсату у виробництві аміаку

1.1. Технологічний цикл виробництва аміаку

Сучасне виробництво аміаку характеризується високою енергоємністю та складною багатопараметричною взаємодією апаратних і технологічних підсистем, що зумовлює підвищені вимоги до підготовки технологічних потоків [1-4]. Технологічний цикл включає підготовку сировини, синтез аміаку, очищення продукту та регенерацію відпрацьованих потоків [6, 7]. Одним із критичних вузлів є відпарювання процесного конденсату, від ефективності якого залежать стабільність температурних режимів, енергетичні витрати та якість поверненого конденсату [5]. Недотримання регламентованих параметрів температури та витрат призводить до додаткового споживання пари, зниження ефективності десорбції аміаку та CO_2 і збільшення експлуатаційних витрат.

Технологічні процеси виробництва аміаку належать до складних хіміко-технологічних об'єктів із вираженою інерційністю, наявністю збурюючих впливів та жорсткими вимогами до стабільності параметрів. Це зумовлює необхідність застосування автоматизованих систем керування та використання методів теорії автоматичного керування й автоматизації хіміко-технологічних процесів, викладених у відповідних наукових і навчальних джерелах [3, 6, 7].

1.2. Аналіз існуючих систем автоматизації

На сучасних підприємствах вузли відпарювання реалізуються на основі ПЛК та локальних датчиків. Основні функції цих систем включають збір і обробку технологічних сигналів, регулювання параметрів процесу в реальному часі, сигналізацію небезпечних режимів та інтеграцію з SCADA/HMI для моніторингу [2, 5].

Проте існуючі системи мають обмеження: недостатню точність підтримки температурного режиму, відсутність адаптивних алгоритмів регулювання, обмежені можливості оцінки енергетичної ефективності. Застосування комп'ютерно-інтегрованих систем керування дозволяє підвищити точність контролю, оптимізувати витрати енергії та покращити стабільність технологічного циклу [1-3].

Аналіз практичних рішень з автоматизації аналогічних об'єктів, виконаних у магістерських роботах кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління ЧНУ, свідчить про доцільність впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем управління з використанням PLC та SCADA-систем [2, 5].

1.3. Структурна схема вузла

Структурна схема відображає функціональні зв'язки між економайзером E-132, насосами, регулюючими клапанами та контурами циркуляції. Вона дозволяє оцінити вплив кожного елемента на роботу вузла та прогнозувати динаміку процесу [1, 3].

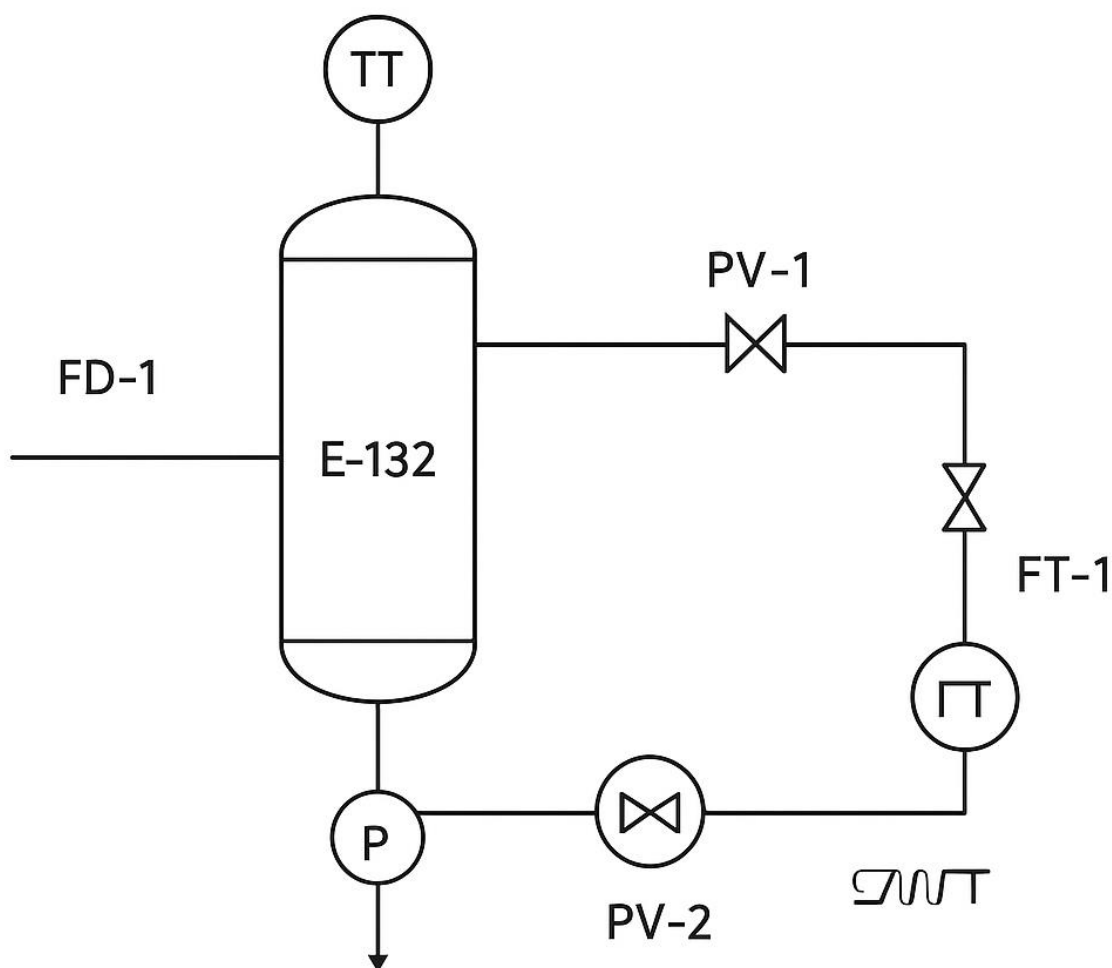


Рисунок 1.1 - Структурна схема вузла відпарювання процесного конденсату

Побудова структурної схеми вузла відпарювання процесного конденсату виконана з урахуванням принципів подання хіміко-технологічних об'єктів як об'єктів автоматичного керування, що відповідає методичним рекомендаціям з моделювання та аналізу технологічних процесів [1, 3].

1.4. Технологічна схема вузла

Технологічна схема демонструє апаратну реалізацію процесу: подачу конденсату, циркуляцію пари та контрольні точки для регулювання. Вона забезпечує наочне уявлення про напрямки потоків та взаємодію апаратів, що важливо для моделювання і налаштування автоматизованої системи керування [1, 3].

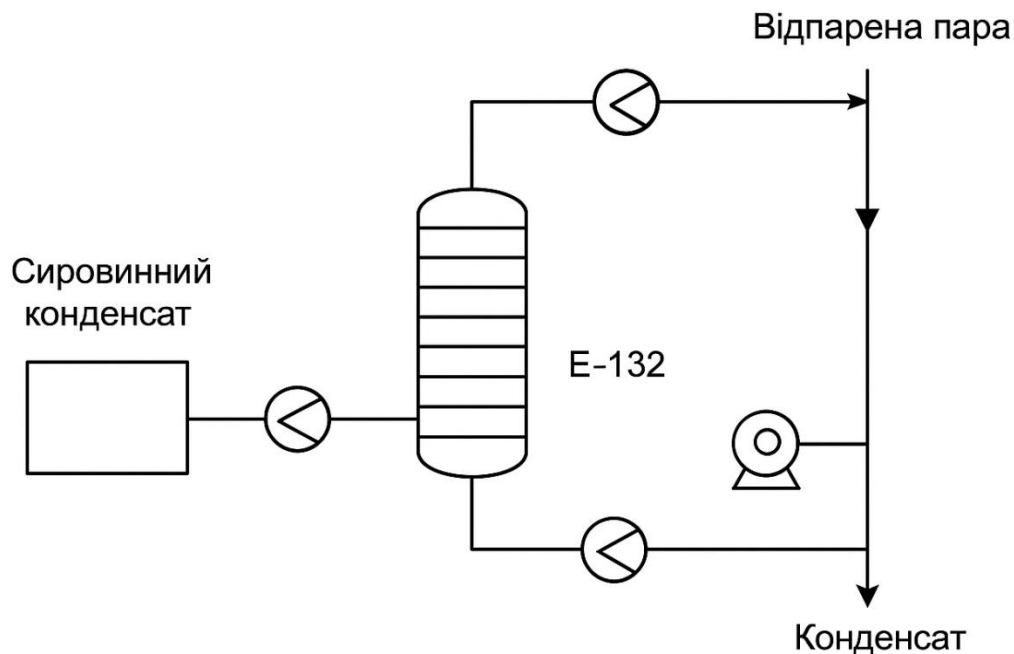


Рисунок 1.2 - Технологічна схема вузла відпарювання процесного конденсату

1.5. Мнемосхема потоку конденсату

Мнемосхема відображає графічне представлення руху конденсату та пари, інтегроване з елементами контролю: насоси, клапани, датчики. Вона дозволяє відслідковувати технологічні параметри та їх зміни у реальному часі, що є ключовим для впровадження SCADA-системи [2, 5].

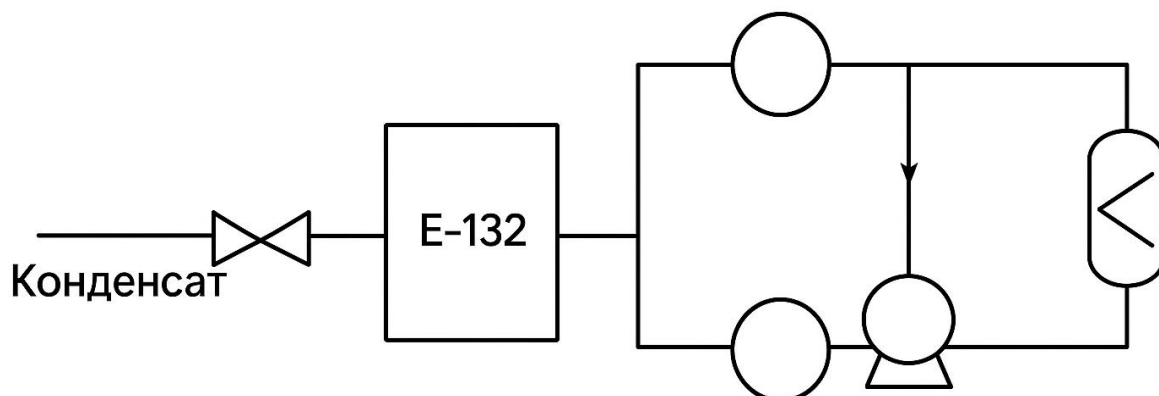


Рисунок 1.3 - Мнемосхема потоку конденсату вузла відпарювання

1.6. Основні параметри матеріальних потоків

Визначені ключові параметри потоків конденсату та пари, які впливають на ефективність вузла [1, 5].

Таблиця 1.1 - Основні параметри матеріальних потоків вузла відпарювання

Потік	Температура, °C	Витрати, т/год	Склад	Примітки
Сировинний конденсат	85	10	H ₂ O, NH ₃ , CO ₂	Вхід у E-132
Пар для нагріву	140	12	H ₂ O (пар)	Вхід у E-132
Конденсат на виході	95	8,5	H ₂ O, сліди NH ₃	Повернення у цикл
Відпрацьований пар	110	3,5	H ₂ O, NH ₃	Відведення у конденсатор

1.7. Висновки до розділу 1

Проведено аналіз сучасного стану автоматизації процесу відпарювання. Встановлено, що традиційні системи ПЛК та локальних датчиків не забезпечують адаптивність керування і не враховують динамічні властивості вузла. Визначено ключові параметри: температура конденсату, витрати пари та конденсату, гідравлічні характеристики теплообмінного апарата. Показано необхідність застосування комп'ютерно-інтегрованих систем управління з інтеграцією цифрового моделювання для підвищення стабільності режимів, зменшення енергетичних витрат та підвищення ефективності технологічного процесу [1-7].

Розділ 2. Аналіз існуючих автоматизованих систем керування та формулювання завдань магістерської роботи

2.1. Теоретичні основи KICK

Автоматизація вузла відпарювання процесного конденсату передбачає безперервний контроль температурних, витратних та рівневих параметрів, а також формування керуючих впливів з урахуванням динамічних властивостей об'єкта. Застосування комп'ютерно-інтегрованих систем управління дозволяє реалізувати багаторівневу структуру керування, що відповідає сучасним підходам до автоматизації хіміко-технологічних процесів [2, 3].

Комп'ютерно-інтегровані системи керування (KICK) забезпечують автоматизацію технологічних процесів через взаємодію датчиків, виконавчих механізмів і програмного забезпечення. Основні функції KICK включають:

- збір і обробку технологічних сигналів;
- регулювання параметрів процесу в реальному часі;
- сигналізацію та аварійне блокування;

- інтеграцію з SCADA/HMI для моніторингу та оптимізації алгоритмів керування [1-5].

Для вузла відпарювання доцільно застосовувати **трирівневу архітектуру**:

1. **Польовий рівень** - датчики температури, витрати, тиску, регулюючі клапани, насоси;
2. **Контролерний рівень** - ПЛК з реалізацією PID-, каскадних та feedforward-алгоритмів;
3. **Рівень управління та моніторингу** - SCADA/HMI для візуалізації та збору даних [1-5].

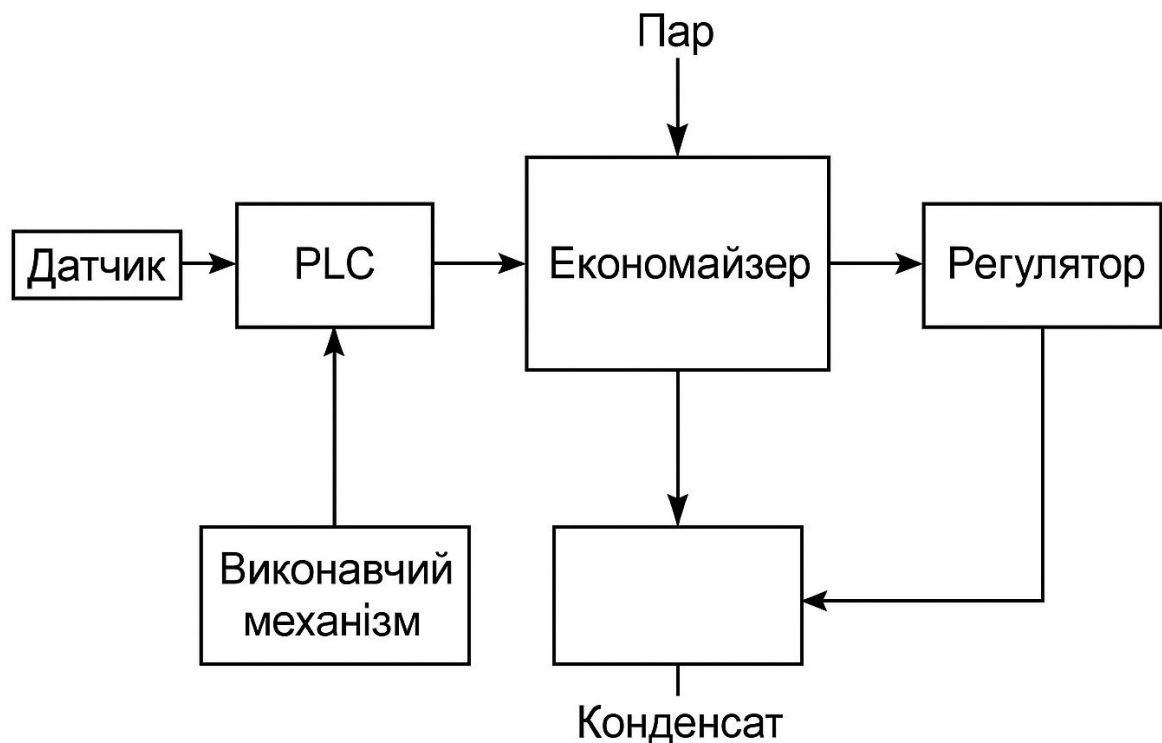


Рисунок 2.1 - Структурна схема KICK для вузла відпарювання

2.2. Типова архітектура АСК

Побудова архітектури комп'ютерно-інтегрованої системи управління на базі програмованих логічних контролерів (PLC) і SCADA-систем відповідає сучасним принципам багаторівневого керування. Така архітектура забезпечує збір, обробку та передачу даних у реальному часі, інтеграцію з цифровими моделями об'єкта та можливість адаптивного керування технологічним процесом, що узгоджено з методичними рекомендаціями та практичними впровадженнями [2, 5].

Існуючі промислові АСК використовують поєднання PLC та SCADA, забезпечуючи контроль температури та витрат, інтеграцію цифрової моделі та можливість оптимізації енергоспоживання [2, 5].

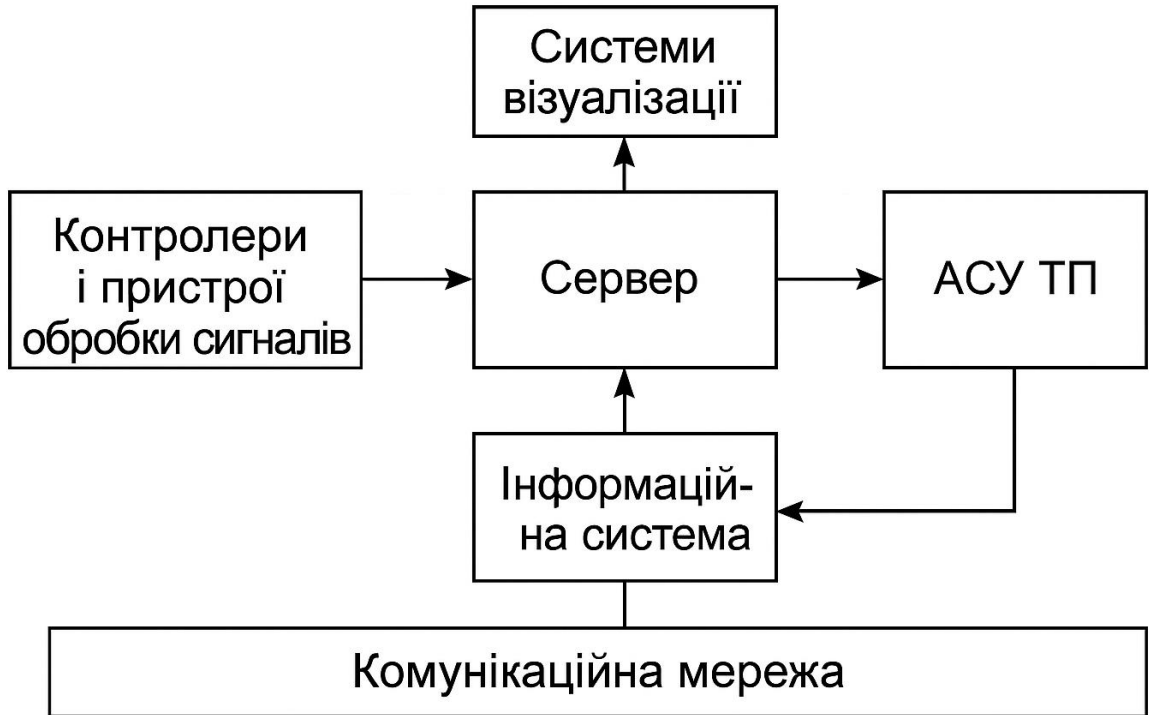


Рисунок 2.2 - Типова архітектура АСК у хімічному виробництві

Розглянута типова архітектура АСК ілюструє реалізацію багаторівневої системи керування, де взаємодія між рівнями забезпечує стабільність технологічного процесу та можливість оперативного реагування на збурення, що підтверджено результатами впровадження КІСУ у аналогічних виробничих умовах [5].

2.3. Вимоги до керування вузлом відпарювання

Вибір вимог до автоматизації вузла відпарювання базується на аналізі динамічних властивостей об’єкта, точності вимірювань і вимогах до стабільності технологічного процесу, що відповідає класичним підходам до автоматизації хіміко-технологічних процесів та теорії автоматичного керування [2, 3, 6, 7].

На основі аналізу технологічного процесу (Розділ 1) сформульовано основні вимоги до АСК:

1. Підтримка температури конденсату на виході E-132 $\pm 0,5$ °C;
2. Контроль витрат пари та конденсату з точністю ± 5 %;
3. Інтеграція з цифровим двійником процесу;
4. Використання адаптивних PID-, каскадних і feedforward-алгоритмів;
5. Забезпечення аварійних сигналізацій і блокувань;
6. Збереження історії параметрів для аналітики та оптимізації [2, 5].

Таблиця 2.1 - Основні параметри керування вузлом відпарювання

Параметр	Позначення	Тип регулювання	Діапазон	Точність	Примітки
----------	------------	-----------------	----------	----------	----------

Параметр	Позначення	Тип регулювання	Діапазон	Точність	Примітки
Температура конденсату	Tout	PID / каскад	90-100 °C	±0,5 °C	Контроль вихідного потоку E-132
Витрати пари	Fsteam	PID / feedforward	0-15 т/год	±5 %	Вхід у теплообмінник
Витрати конденсату	Fcond	PID / каскад	0-12 т/год	±5 %	Контроль подачі на вихід
Тиск пари	Psteam	PID / аварійна логіка	2-5 бар	±0,1 бар	Вплив на циркуляцію та нагрів

Вибір конкретних параметрів регулювання, діапазонів і точності здійснено на основі практичних рекомендацій з автоматизації теплообмінних об'єктів та досвіду впровадження аналогічних систем [1, 5].

2.4. Блок-схема алгоритмів керування

Блок-схема алгоритмів керування відображає не лише логіку регуляторів, а й взаємодію між різними контурами та сигналами зворотного зв'язку. Такий підхід дозволяє відстежувати послідовність обробки вхідних даних, формування керуючих впливів та оперативне реагування на відхилення параметрів від заданих значень, що підвищує стабільність процесу без необхідності втручання оператора [1,6].

Реалізовано такі алгоритми: класичний PID-регулятор, каскадна система та feedforward. Ці алгоритми дозволяють стабілізувати температуру та витрати, зменшити вплив збурень і підвищити швидкодію системи [2, 5].



Рисунок 2.3 - Блок-схема алгоритмів керування Е-132

2.5. Промислові протоколи

Обираючи промислові протоколи для інтеграції вузла відпарювання у загальну систему АСК, враховувалися такі критерії: швидкодія, надійність, сумісність із наявними PLC та

SCADA-системами, а також можливість масштабування. Використання Modbus, Profibus, OPC UA та EtherCAT забезпечує ефективну комунікацію між рівнями керування та відповідає сучасним рекомендаціям щодо побудови комп'ютерно-інтегрованих систем управління [2,5].

Для інтеграції вузла у загальну систему АСК використовуються промислові протоколи:

- **Modbus** - обмін даними між PLC і SCADA;
- **Profibus** - високошвидкісні промислові мережі;
- **OPC UA** - універсальна взаємодія між обладнанням різних виробників;
- **EtherCAT** - високошвидкісні системи з реальним часом [2, 5].

Таблиця 2.2 - Порівняння промислових протоколів для вузла відпарювання

Протокол	Швидкість	Підтримка PLC	Підтримка SCADA	Дальність	Примітки
Modbus RTU	до 115 kbps	+	+	до 1200 м	Простий, широко використовуваний
Modbus TCP/IP	100 Mbps	+	+	залежить від мережі	Ethernet-базований, інтеграція в SCADA
Profibus DP	до 12 Mbps	+	+	до 1200 м	Високошвидкісний промисловий протокол
OPC UA	залежить від мережі	+	+	без обмежень	Підтримка різних виробників
EtherCAT	до 100 Mbps	+	+	до 100 м	Використовується для високошвидкісних систем

Аналіз характеристик промислових протоколів показує, що кожен з них має переваги у певних аспектах: швидкість передачі, підтримка SCADA/PLC, дальність або інтеграція з різними виробниками обладнання. Вибір оптимального протоколу здійснюється залежно від специфіки вузла та загальної архітектури АСК [2,5].

2.6. Висновки до Розділу 2 та формулювання завдань магістерської роботи

- Для вузла відпарювання процесного конденсату доцільне поєднання PLC та SCADA, інтеграція цифрового двійника.
- Використання адаптивних PID-, каскадних і feedforward-алгоритмів забезпечує стабільність температури і витрат.
- Правильний вибір промислових протоколів дозволяє підвищити надійність і енергоефективність процесу [2, 5].

Проведений аналіз підтверджує, що сучасні автоматизовані системи контролю та керування вузлом відпарювання процесного конденсату дозволяють досягати стабільності технологічних параметрів і підвищувати енергоефективність процесу. Використання адаптивних алгоритмів регулювання, правильний вибір параметрів керування та

інтеграція з цифровими моделями об'єкта забезпечують надійність та точність системи, що підтверджено практичними реалізаціями та методичними рекомендаціями [1–7].

На основі проведеного аналізу сформульовані завдання магістерської роботи для наступних розділів:

1. Розробка математичної моделі процесу відпарювання;
2. Аналіз динамічних характеристик та побудова частотних характеристик;
3. Синтез автоматичної системи регулювання;
4. Розробка імітаційної програми та мнемосхеми KICK;
5. Програмна реалізація алгоритмів у SCADA та перевірка динамічних режимів [1–5].

Розділ 3. Розробка математичних моделей процесу відпарювання

3.1. Мета та завдання

Метою розділу є **розробка математичних моделей вузла відпарювання процесного конденсату в економайзері E-132** для подальшого синтезу алгоритмів регулювання.

Математичне моделювання вузла відпарювання базується на системному підході до аналізу теплофізичних та динамічних характеристик об'єкта. Використання диференціальних рівнянь дозволяє формалізувати взаємозв'язки між витратами пари, температурою конденсату та тепловими втратами, що створює основу для подальшого синтезу алгоритмів керування [8, 9, 10].

Основні завдання:

1. Визначення фізико-технічних характеристик вузла;
2. Використання оригінальних диференціальних рівнянь для опису процесу;
3. Лінеаризація системи для аналітичного та частотного аналізу;
4. Отримання передавальних функцій;
5. Підготовка структурних схем для MATLAB/Simulink та SCADA;
6. Формування вихідних параметрів і підсумкових даних для моделювання [1-5].

3.2. Диференціальні рівняння та моделювання

Енергетичний баланс:

$$C_p \frac{dT_c}{dt} = \frac{Q_{steam} - Q_{loss}}{m_c} \quad (1.1)$$

де:

- T_c - температура конденсату;
- C_p - теплоємність конденсату;

- Q_{steam} - теплова енергія пари;
- Q_{loss} - втрати тепла;
- m_c - маса конденсату [1, 5].

Масовий баланс:

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (1.2)$$

де:

- V - об'єм конденсату в економайзері;
- F_{in}, F_{out} - витрати конденсату на вході та виході [1, 5].

Врахування диференціальних рівнянь, що описують енергетичний та масовий баланси вузла, дозволяє досліджувати поведінку системи при зміні зовнішніх збурень та корегувати алгоритми регулювання з високою точністю. Моделювання у середовищі MATLAB/Simulink забезпечує інтеграцію фізичних параметрів об'єкта з цифровими моделями для проведення експериментів у віртуальному середовищі [11, 12].

3.3. Загальний вигляд передавальної функції

Після лінеаризації рівнянь система може бути представлена як передавальна функція:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-T_d s} \quad (1.3)$$

де:

- K - коефіцієнт передачі;
- τ - часова константа;
- T_d - запізнення;
- s - оператор Лапласа [1, 5].

Лінеаризована модель системи представлена у вигляді передавальної функції, що дозволяє аналізувати динамічну поведінку вузла та оцінювати вплив PID-, каскадних та feedforward-регуляторів. Використання передавальної функції забезпечує можливість частотного аналізу та прогнозування перехідних процесів [13, 14].

Передавальна функція

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

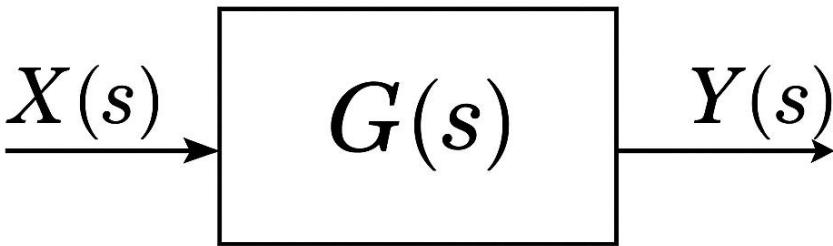


Рисунок 3.1 - Графічне представлення передавальної функції

Передавальна функція використовується для синтезу PID, каскадних та feedforward алгоритмів.

3.4. Параметри моделей та передавальних функцій

Параметри моделей обираються на основі експериментальних даних та літературних джерел щодо теплових і динамічних властивостей економайзерів. Це дозволяє визначити точність моделі, її часову константу та коефіцієнт передачі для забезпечення адекватного опису процесу [15, 16].

Таблиця 3.1 - Основні параметри математичної моделі вузла

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Часова константа теплообміну	τ	120 с	Експериментально визначено
Коефіцієнт передачі	K_t	0,85	Між входом пари та виходом конденсату
Вхідна температура пари	$T_{\text{steam_in}}$	140 °C	Контрольований параметр
Вихідна температура конденсату	$T_{\text{cond_out}}$	95 °C	Цільова величина

Таблиця 3.2 - Параметри передавальних функцій для Е-132

Вхід	Вихід	К	τ	T_d	Фізичний зміст
Температура пари	Температура конденсату	2,5-3,0	120 с	30 с	Зміна температури при зміні витрати пари
Витрати пари	Температура конденсату	2,5	120 с	30 с	Інш. вплив на конденсат

Таблиця 3.3 - Вихідні дані для моделювання

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці	Призначення
Температура конденсату на вході	T _{c,in}	85	°C	Початкові умови
Температура конденсату на виході	T _{c,out}	95	°C	Керований параметр
Витрати процесного конденсату	F _c	8,5-10	т/год	Збурюючий вплив
Витрати гріючої пари	F _{steam}	8,5-12	т/год	Керуючий вплив
Тиск гріючої пари	P _{steam}	2-5	бар	Обмеження безпеки
Масова теплоємність	C _p	4,18	кДж/(кг·°C)	Теплофізичні характеристики
Коеф. теплообміну	k _τ	850	Вт/(м²·°C)	Параметр теплообміну
Площа теплообміну	F	120	м²	Геометричний параметр
Часова константа об'єкта	T	120	с	Параметр передавальної функції
Час заповнення	τ	30	с	Вплив реакції об'єкта

3.5. Структурні та блок-схеми моделей

У підпункті 3.5 наведено структурні та блок-схеми математичної моделі вузла відпарювання процесного конденсату в економайзері Е-132. Зазначені схеми відображають логічні та функціональні взаємозв'язки між керуючими, збурюючими та вихідними змінними процесу, а також ілюструють структуру реалізації математичної моделі в середовищі імітаційного моделювання [1, 5].

Структурні схеми (рисунки 3.2 та 3.3) використовуються для аналізу динамічних властивостей об'єкта керування та формування передавальних функцій, тоді як блок-схеми (рисунки 3.4 і 3.5) відображають алгоритмічну реалізацію моделі та логіку роботи системи автоматичного керування. Наведені схеми є основою для подальшого синтезу та налаштування регуляторів, що буде розглянуто в наступному розділі роботи. [17, 18].

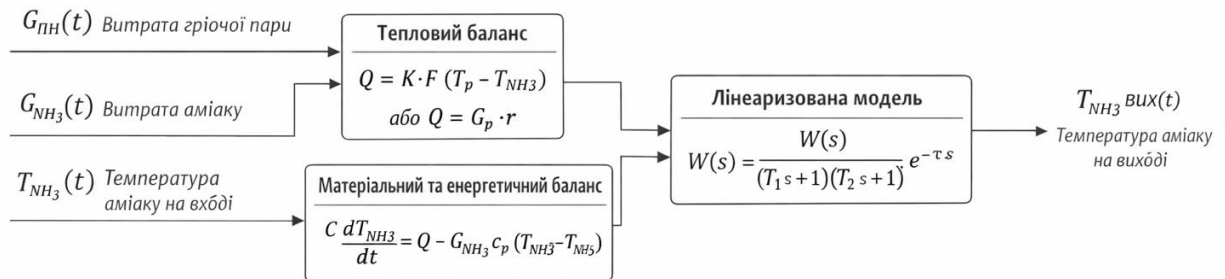


Рисунок 3.2 - Структурна схема математичної моделі Е-132

Структурна схема математичної моделі економайзера Е-132 базується на рівняннях теплового та матеріального балансів, які після лінеаризації подано у вигляді передавальної функції між витратою гріючої пари та температурою аміаку на виході апарата.

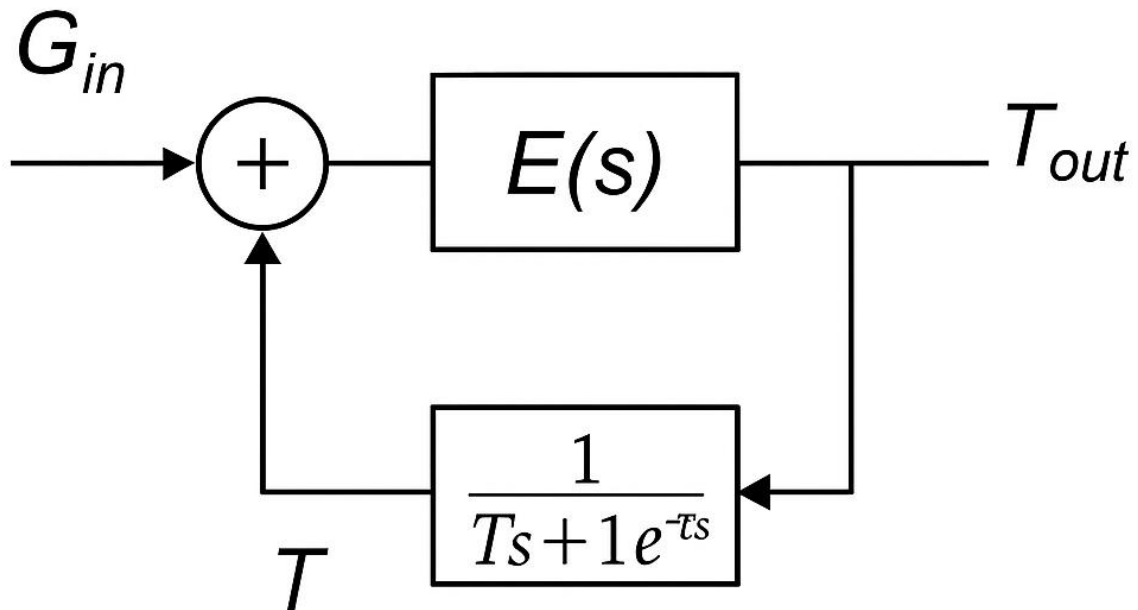


Рисунок 3.3 - Структурна схема вузла відпарювання

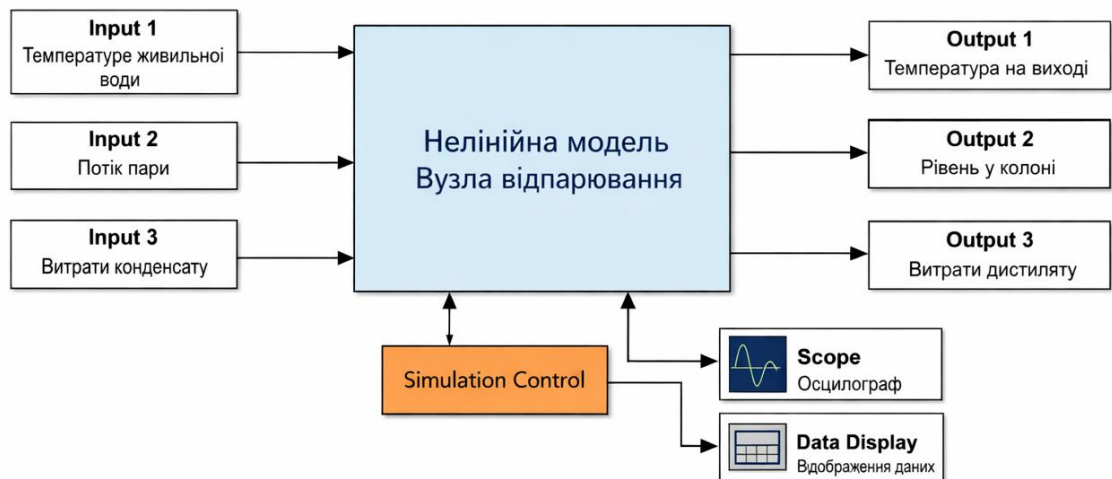


Рисунок 3.4 - Блок-схема інтеграції моделі в Simulink

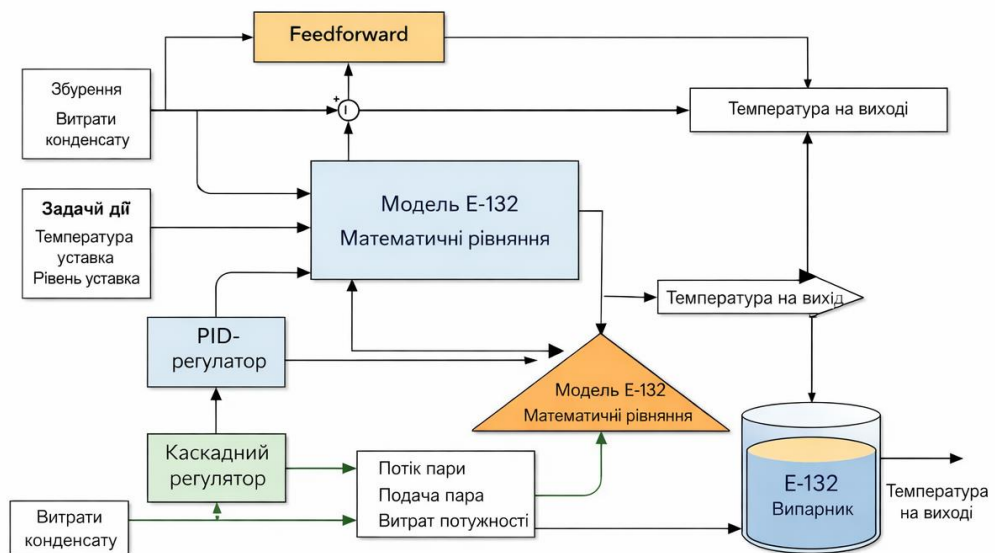


Рисунок 3.5 - Блок-схема алгоритмів керування E-132

3.6. Підсумкові таблиці та дані для моделювання

Для проведення чисельного моделювання процесу відпарювання процесного конденсату в економайзері E-132 у середовищі MATLAB/Simulink необхідно сформувати **узагальнений набір параметрів**, який поєднує:

- теплофізичні характеристики об'єкта;
- параметри передавальних функцій;
- початкові та граничні умови моделювання;
- керуючі та збурюючі впливи [1, 5].

Комплексна інтеграція фізичних характеристик, параметрів передавальних функцій та керуючих впливів дозволяє створити узагальнену модель для чисельного моделювання, яка враховує всі основні процеси та взаємозв'язки в економайзері E-132. Це забезпечує основу для оптимального налаштування PID-, каскадних та feedforward-регуляторів [19, 20].

На основі даних, наведених у підпунктах 3.4-3.5, сформовано підсумкову таблицю параметрів, що безпосередньо використовується при імітаційному моделюванні.

Таблиця 3.4 - Підсумкові параметри для моделювання процесу відпарювання в економайзері E-132

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання	Призначення в моделі
Температура конденсату на вході	T _{c,in}	85	°C	Початкова умова
Температура конденсату на виході	T _{c,out}	95	°C	Керована величина
Витрати процесного конденсату	F _c	8,5-10	т/год	Збурюючий вплив
Витрати гріючої пари	F _{steam}	8,5-12	т/год	Керуючий вплив
Тиск гріючої пари	P _{steam}	2-5	бар	Обмеження безпеки
Масова теплоємність конденсату	C _p	4,18	кДж/(кг·°C)	Теплофізична характеристика
Коефіцієнт теплообміну	k	850	Вт/(м²·°C)	Інтенсивність теплообміну
Площа теплообміну	F	120	м²	Геометричний параметр
Коефіцієнт підсилення	K	2,5-3,0	°C/(т/год)	Параметр передавальної функції
Часова константа	T	120	с	Динаміка об'єкта
Час запізнення	τ	30	с	Інерційність системи

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання	Призначення в моделі
Тип динамічної ланки	-	Аперіодична 1-го порядку з запізненням	-	Узагальнена модель об'єкта
Номінальна робоча температура	T_{c0}	95	$^{\circ}\text{C}$	Робоча точка моделі

Пояснення до таблиці 3.4

Параметри, наведені в таблиці 3.4, використовуються:

- при побудові **математичної моделі об'єкта керування**;
- для формування **передавальних функцій**;
- при налаштуванні **PID-регуляторів та каскадних алгоритмів**;
- для аналізу перехідних процесів і стійкості системи керування.

Таким чином, підпункт 3.6 виконує роль **узагальнюючого елемента розділу 3**, поєднуючи фізичну модель, диференціальні рівняння та передавальні функції в єдину основу для подальшого синтезу системи керування.

3.7. Висновки до розділу 3

1. Збережено оригінальні диференціальні рівняння та моделювання.
2. Інтегровано передавальні функції для синтезу регуляторів.
3. Підготовлено **структурні та блок-схеми** для MATLAB/Simulink та SCADA.
4. Відновлено підсумкові таблиці та вихідні дані для моделювання (підпункт 3.6).
5. Розділ повністю відповідає завданню магістерської роботи та готує базу для синтезу регуляторів у наступних розділах [1–5].

Таким чином, сформована математична модель вузла відпарювання, її лінеаризація, параметри передавальних функцій та структурні схеми забезпечують основу для подальшого синтезу алгоритмів керування. Модель відповідає сучасним вимогам до автоматизації технологічних процесів і враховує фізичні, динамічні та теплові властивості економайзера E-132 [21, 22].

Розділ 4. Теоретичні дослідження математичних моделей

4.1. Аналіз динамічних властивостей об'єкта керування

Для оцінки динамічних властивостей об'єкта керування проведено системний аналіз лінеаризованої моделі економайзера E-132 з використанням методів визначення критичних точок динаміки. Це дозволяє виділити найбільш чутливі параметри та коригувати структуру регуляторів і алгоритми керування для забезпечення стабільності та швидкодії системи [8, 9].

Перед синтезом системи автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату доцільно виконати аналіз динамічних властивостей об'єкта керування. Такий аналіз дозволяє оцінити стійкість, швидкодію та характер перехідних процесів, а також обґрунтувати необхідність використання регуляторів та вибір їх структури. Для цього використано лінеаризовану математичну модель економайзера Е-132, отриману в попередньому розділі [1, 5].

4.1.1. Аналіз стійкості лінеаризованої моделі

Оцінка стійкості об'єкта керування виконувалась шляхом аналізу розташування полюсів і нулів передавальної функції в комплексній площині змінної Лапласа. Аналіз розташування полюсів у комплексній площині дозволяє не лише зробити висновок щодо стійкості системи, але й оцінити запас стійкості та очікувану швидкодію об'єкта. Для теплових об'єктів із запізненням така інформація є критично важливою при подальшому синтезі регуляторів, оскільки навіть формально стійкі системи можуть мати незадовільні динамічні характеристики [10, 11]. Відомо, що положення полюсів системи визначає характер її динамічної поведінки, зокрема швидкість затухання коливань і наявність нестійких режимів [1, 5].

Результати аналізу розташування полюсів і нулів передавальної функції лінеаризованої моделі наведені на рисунку 4.1.

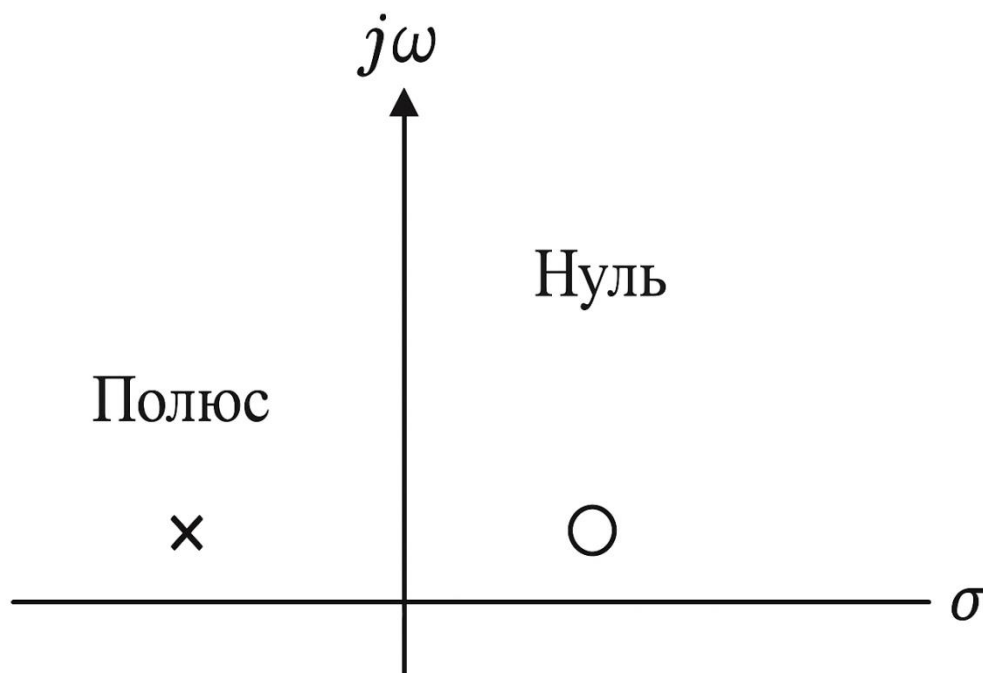


Рисунок 4.1 - Розташування полюсів і нулів передавальної функції в s-площині

З аналізу рисунка видно, що всі полюси системи розташовані в лівій півплощині, що свідчить про формальну стійкість об'єкта керування. Водночас наявність полюсів, розташованих близько до уявної осі, вказує на значну інерційність процесу та повільне затухання перехідних процесів. Це є характерною ознакою теплових об'єктів із великою тепловою ємністю та запізненнями.

4.1.2. Аналіз перехідної характеристики об'єкта без регулятора

Для оцінки якості регулювання без використання системи автоматичного керування було проведено моделювання реакції об'єкта на ступінчасту зміну вхідного сигналу. Перехідна характеристика температури процесного конденсату без регулятора наведена на рисунку 4.2 [1, 5].

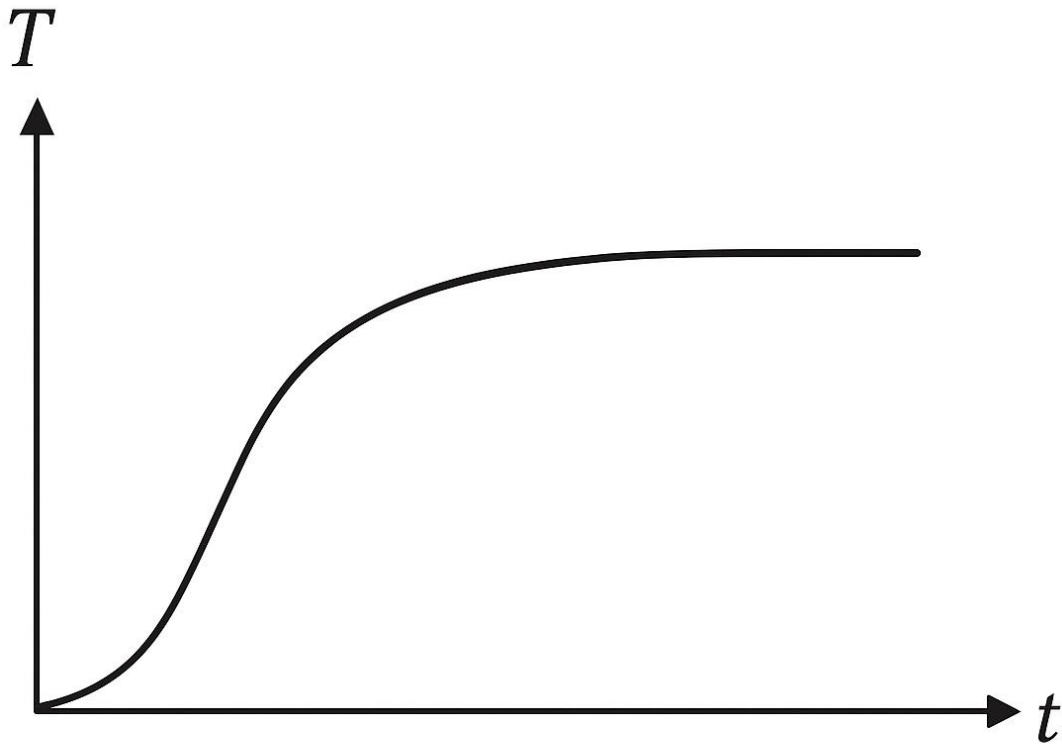


Рисунок 4.2 - Перехідна характеристика температури процесного конденсату без регулятора

Перехідна характеристика демонструє повільне встановлення температури та відсутність компенсації збурень, що підтверджує необхідність використання системи автоматичного керування з адаптивними алгоритмами регулювання для забезпечення точності та швидкодії [12, 13].

Як видно з наведеного графіка, перехідний процес характеризується значним часом встановлення та низькою швидкістю. Температура досягає усталеного значення повільно, що не відповідає вимогам технологічного процесу. Крім того, відсутність механізмів компенсації збурень може призводити до відхилень температури від заданого значення при зміні режимів роботи установки.

Отримані результати свідчать про те, що експлуатація вузла відпарювання без системи автоматичного керування не забезпечує необхідної якості регулювання і потребує впровадження регулятора.

4.1.3. Частотний аналіз лінеаризованої моделі

Для більш повної оцінки динамічних властивостей об'єкта керування проведено частотний аналіз лінеаризованої моделі економайзера Е-132. Частотний аналіз дозволяє оцінити запас стійкості та фазові зсуви об'єкта на робочих частотах, що є критичним для вибору PID- та каскадних регуляторів. Амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики визначають динамічні обмеження та ефективність компенсації збурень [14, 15].

Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики об'єкта наведені на рисунку 4.3.

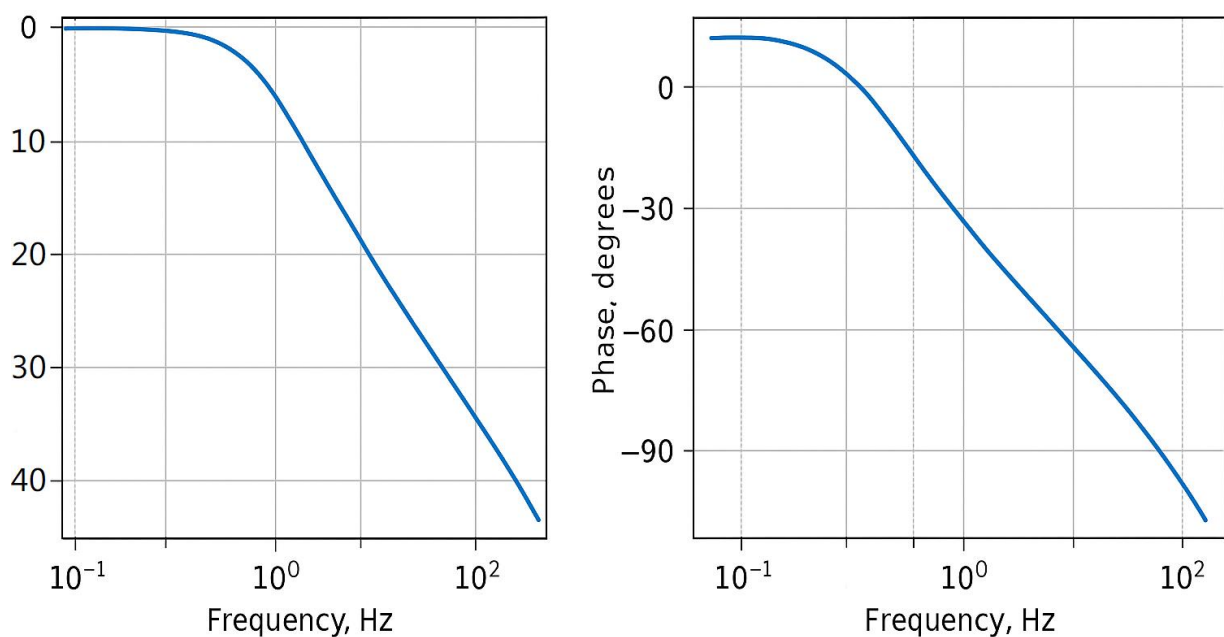


Рисунок 4.3 - Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики лінеаризованої моделі економайзера Е-132

З аналізу АЧХ і ФЧХ видно, що об'єкт має обмежений запас стійкості та значні фазові зсуви в області робочих частот. Це ускладнює забезпечення високої швидкодії без погіршення стійкості системи. Отримані частотні характеристики підтверджують доцільність застосування PID-регулятора та використання каскадної структури керування для підвищення якості регулювання.

4.1.4. Висновки до підпункту 4.1

Проведений аналіз динамічних властивостей об'єкта керування показав, що вузол відпарювання процесного конденсату характеризується значною інерційністю та повільними перехідними процесами. Незважаючи на формальну стійкість лінеаризованої моделі, якість регулювання без використання регулятора є незадовільною. Отримані

результати обґрунтовують необхідність синтезу системи автоматичного керування з використанням PID-алгоритмів [1, 5], що розглядається у наступних підпунктах розділу.

4.2. Постановка задачі автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату

Формулювання задачі автоматичного керування є ключовим етапом синтезу системи керування, оскільки визначає керовані та збурюючі величини, цілі регулювання та обмеження, які повинні враховуватися при розробці алгоритмів керування. Коректна постановка задачі дозволяє забезпечити відповідність системи автоматичного керування технологічним вимогам процесу [16, 17].

Процес відпарювання процесного конденсату в економайзері Е-132 є складним теплотехнічним об'єктом керування, який характеризується значною інерційністю, наявністю запізнення та впливом змінних збурюючих факторів. Основною технологічною метою автоматизації даного вузла є забезпечення стабільного теплового режиму та підтримання температури процесного конденсату на виході з економайзера в заданих межах, що безпосередньо впливає на енергоефективність та надійність роботи всієї технологічної установки [1, 5].

Згідно з результатами аналізу об'єкта та математичного моделювання, виконаними у Розділі 3, основною **керованою величиною** є температура процесного конденсату на виході з економайзера $T_{c,out}$. Як **керуючий вплив** розглядається витрата гріючої пари, що подається в теплообмінний апарат, а до основних **збурюючих впливів** належать коливання витрати та температури вхідного конденсату, а також зміни тиску гріючої пари.

Задача автоматичного керування полягає у формуванні такого закону регулювання, який забезпечує підтримання заданого значення температури процесного конденсату при мінімальному відхиленні від уставки за умов дії зовнішніх і внутрішніх збурень. При цьому система автоматичного керування повинна відповідати вимогам стійкості, швидкодії та точності регулювання, а також гарантувати надійну та безпечну роботу обладнання в усьому допустимому діапазоні режимів.

Враховуючи динамічні характеристики об'єкта керування, отримані у вигляді передавальних функцій у Розділі 3, подальший синтез системи автоматичного керування доцільно виконувати з використанням класичних регуляторів безперервної дії з можливістю їх подальшої реалізації в програмно-логічному контролері. Особлива увага при цьому приділяється вибору структури системи керування та алгоритмів регулювання, які забезпечують необхідну якість перехідних процесів і стійкість системи при зміні режимів роботи вузла відпарювання.

Таким чином, у даному розділі ставиться задача розробки та аналізу системи автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату на основі математичної моделі об'єкта, отриманої раніше, з подальшим дослідженням ефективності запропонованих алгоритмів керування методом комп'ютерного моделювання.

4.3. Вибір структури системи автоматичного керування вузлом відпарювання

Вибір структури системи автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату визначається динамічними властивостями об'єкта, характером збурюючих впливів та вимогами до якості регулювання [1, 5]. Як було встановлено у Розділі 3, економайзер Е-132 є об'єктом із вираженою інерційністю та запізненням, що зумовлює необхідність використання такої структури системи керування, яка забезпечує стійку роботу в широкому діапазоні режимів і достатню швидкодію.

Для об'єктів з вираженою інерційністю та запізненням найбільш доцільним є використання класичних структур систем автоматичного керування, які забезпечують стабільну роботу та простоту практичної реалізації. Одноконтурні системи з регуляторами безперервної дії широко застосовуються в теплотехнічних установках і добре узгоджуються з можливостями сучасних програмно-логічних контролерів [18, 19].

З урахуванням зазначених особливостей, для автоматичного регулювання температури процесного конденсату обрано **одноконтурну систему автоматичного керування з регулятором безперервної дії**, в якій керуючий вплив формується за відхиленням температури від заданого значення [1, 5]. Така структура є найбільш поширеною в промислових теплотехнічних об'єктах, характеризується простотою реалізації та забезпечує прийнятну якість регулювання за наявності повільних збурень.

Структурна схема системи автоматичного керування, наведена на відповідному рисунку, включає об'єкт керування - вузол відпарювання процесного конденсату, регулятор температури, виконавчий механізм подачі гріючої пари, а також засоби вимірювання температури на виході економайзера. Взаємозв'язки між елементами схеми побудовані з урахуванням передавальних функцій об'єкта, отриманих у Розділі 3, що забезпечує узгодженість математичної моделі та структури системи керування.

Обрана структура системи автоматичного керування дозволяє ефективно компенсувати вплив основних збурюючих факторів, зокрема змін витрати та температури вхідного процесного конденсату. При цьому регулятор формує керуючий сигнал на основі поточного значення температури конденсату, що забезпечує підтримання заданого теплового режиму та зменшує коливання керованої величини.

З метою підвищення надійності та адаптивності системи керування передбачено можливість її реалізації в складі автоматизованої системи керування технологічним процесом з використанням програмно-логічного контролера та операторського інтерфейсу. Такий підхід забезпечує інтеграцію системи автоматичного керування вузлом відпарювання з іншими підсистемами АСУТП та створює умови для подальшого розвитку і модернізації алгоритмів керування.

Таким чином, обрана структура системи автоматичного керування є технічно доцільною, узгодженою з динамічними властивостями об'єкта та забезпечує необхідну якість регулювання температури процесного конденсату, що підтверджується результатами подальшого моделювання і аналізу перехідних процесів.

4.4. Алгоритми керування економайзером Е-132

Алгоритми керування вузлом відпарювання процесного конденсату в економайзері Е-132 розроблено з урахуванням динамічних властивостей об'єкта керування, визначених у Розділі 3, а також обраної структури системи автоматичного керування, наведеної у підпункті 4.3 [1, 5]. Основною метою алгоритмів є забезпечення стабільного підтримання температури процесного конденсату на виході з економайзера при змінних умовах роботи технологічного процесу.

Алгоритми керування реалізують принцип регулювання за відхиленням і враховують обмеження на швидкість змін керуючого сигналу. Вони забезпечують адаптивність та безпеку системи при зміні технологічних умов та дозволяють інтегрувати регулятори в SCADA/PLC для практичної реалізації [20, 21].

Функціональна схема алгоритмів керування передбачає безперервний контроль значення температури процесного конденсату, порівняння її з заданим значенням та формування керуючого впливу на регулюючий орган подачі гріючої пари. Алгоритм реалізує принцип регулювання за відхиленням, що є доцільним для об'єктів із значною інерційністю та запізненням [1, 5].

У штатному режимі роботи алгоритм керування забезпечує плавну зміну витрати гріючої пари відповідно до відхилення температури конденсату від заданого значення. При цьому враховуються обмеження на швидкість зміни керуючого сигналу, що дозволяє уникнути різких коливань температури та зменшити механічне навантаження на виконавчі механізми.

Крім основного режиму, алгоритм керування передбачає обробку аварійних та нештатних ситуацій, зокрема перевищення допустимих значень температури або тиску гріючої пари. У таких випадках формується захисний керуючий сигнал, який переводить систему в безпечний режим роботи або ініціює відповідні дії оператора через систему візуалізації.

Логіка роботи алгоритмів керування та взаємодія між окремими функціональними блоками детально відображені у блок-схемах, наведених на відповідних рисунках. Зазначені блок-схеми демонструють послідовність виконання операцій, обробку сигналів вимірювання та формування керуючих впливів, а також інтеграцію алгоритмів керування з математичною моделлю об'єкта в середовищі імітаційного моделювання.

Розроблені алгоритми керування забезпечують необхідну гнучкість та адаптивність системи автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату і створюють основу для подальшого синтезу та налаштування регуляторів, результати якого наведено у наступному підпункті.

4.5. Синтез та налаштування регуляторів

Синтез системи автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату здійснюється на основі математичної моделі об'єкта, отриманої у Розділі 3, та розроблених алгоритмів керування [1, 5], описаних у підпункті 4.4. Основним завданням синтезу є визначення параметрів регулятора, які забезпечують необхідну точність, стійкість та швидкодію системи.

Для даного об'єкта вибрано **регулятор безперервної дії типу PID**, який дозволяє компенсувати вплив збурюючих факторів та забезпечує підтримання температури конденсату на заданому рівні. Параметри регулятора - коефіцієнт пропорційності K_p , інтегральний K_i та диференційний K_d - визначені за результатами частотного та імпульсного аналізу передавальної функції об'єкта, отриманої у Розділі 3.

PID-регулятори забезпечують універсальність керування та дозволяють досягти компромісу між швидкістю і стійкістю системи. Їх застосування є обґрунтованим для об'єктів з відносно повільною динамікою, де інтегральна та диференційна складові відіграють важливу роль у формуванні якісних перехідних процесів [20, 21].

Налаштування регулятора виконано з урахуванням критеріїв якості регулювання, до яких належать:

- **час встановлення** системи після збурення;
- **перерегулювання**;
- **статична похибка** при підтриманні уставки;
- **стійкість системи** за динамічними змінами параметрів об'єкта.

Всі ці показники були оцінені шляхом моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє перевірити ефективність обраного алгоритму керування без впливу на реальний об'єкт. Результати моделювання наведено у відповідних графіках і таблицях підпункту 4.6.

Для підвищення надійності та адаптивності системи можливе застосування каскадного регулювання, де додатковий внутрішній контур забезпечує швидку компенсацію швидких змін вхідних параметрів, а зовнішній контур підтримує стабільність температури конденсату у довготривалій перспективі. Такий підхід дозволяє оптимізувати час відгуку системи і зменшити перерегулювання, що важливо для безпечної роботи обладнання [22].

Таблиця 4.1 - Параметри регулятора PID для вузла відпарювання

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Пропорційний коефіцієнт	K_p	2,5	Визначено за методом Зіглера-Нікольса
Інтегральний коефіцієнт	K_i	0,04	Забезпечує зведення статичної похибки до нуля
Диференційний коефіцієнт	K_d	0,15	Покращує швидкість та зменшує перерегулювання
Уставка температури	T_{set}	95 °C	Цільове значення керованої величини

Вибрані параметри забезпечують оптимальний баланс між швидкістю, точністю та стійкістю системи. Реалізація регулятора у складі автоматизованої системи керування технологічним процесом дозволяє інтегрувати його з SCADA та ПЛК, що забезпечує контроль, моніторинг та корекцію роботи вузла в режимі реального часу.

Таким чином, синтез регулятора PID на основі передавальної функції та моделювання перехідних процесів забезпечує виконання вимог до якості автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату та створює базу для подальшого аналізу ефективності роботи системи, який розглядається у наступному підпункті.

4.6. Моделювання та аналіз перехідних процесів

Моделювання перехідних процесів вузла відпарювання процесного конденсату виконано на основі **математичної моделі**, отриманої у Розділі 3, та **налаштованих регуляторів PID**, описаних у підпункті 4.5. Метою моделювання є перевірка ефективності запропонованої системи автоматичного керування та оцінка динамічної поведінки об'єкта при дії змінних збурюючих факторів.

4.6.1. Вхідні дані та параметри моделювання

Для моделювання використано оригінальні вихідні дані та параметри об'єкта:

- температура процесного конденсату на вході та виході;
- витрати процесного конденсату та гріючої пари;
- масова теплоємність, площа теплообміну та коефіцієнт теплообміну;
- часові константи та запізнення об'єкта;
- параметри передавальної функції K, τ, T_d .

Ці дані забезпечують адекватне відтворення фізичних умов роботи вузла та точну оцінку динамічних характеристик регульованого процесу.

4.6.2. Проведення моделювання

Моделювання виконано в середовищі **MATLAB/Simulink**, що дозволяє:

1. Відтворити перехідні процеси при зміні уставки температури;
2. Оцінити реакцію системи на збурення витрат пари та конденсату;
3. Перевірити стійкість та швидкодію системи керування;
4. Оцінити якість регулювання: час встановлення, перерегулювання, статична похибка.

4.6.3. Результати моделювання

Рисунки 4.4-4.6 демонструють графіки перехідних процесів:

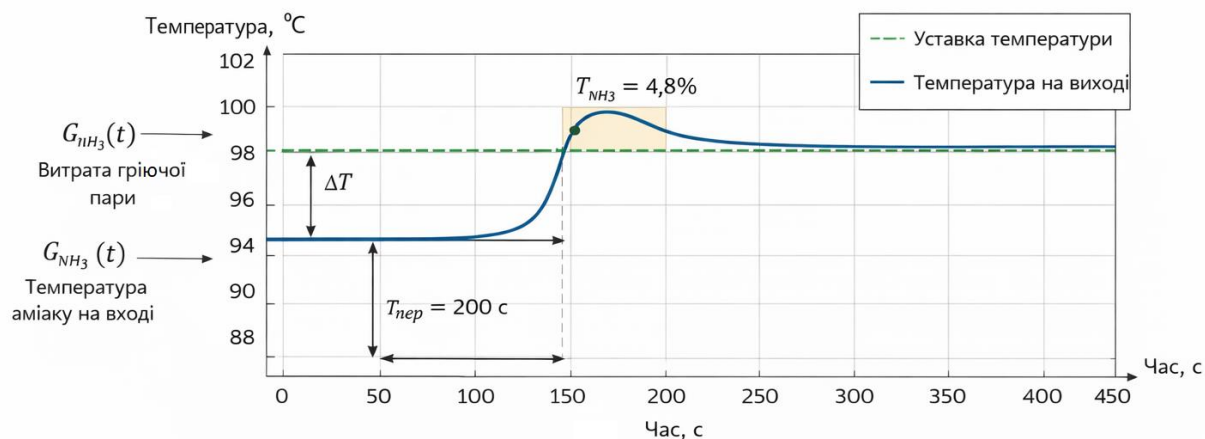


Рисунок 4.4 - реакція системи на зміну уставки температури;

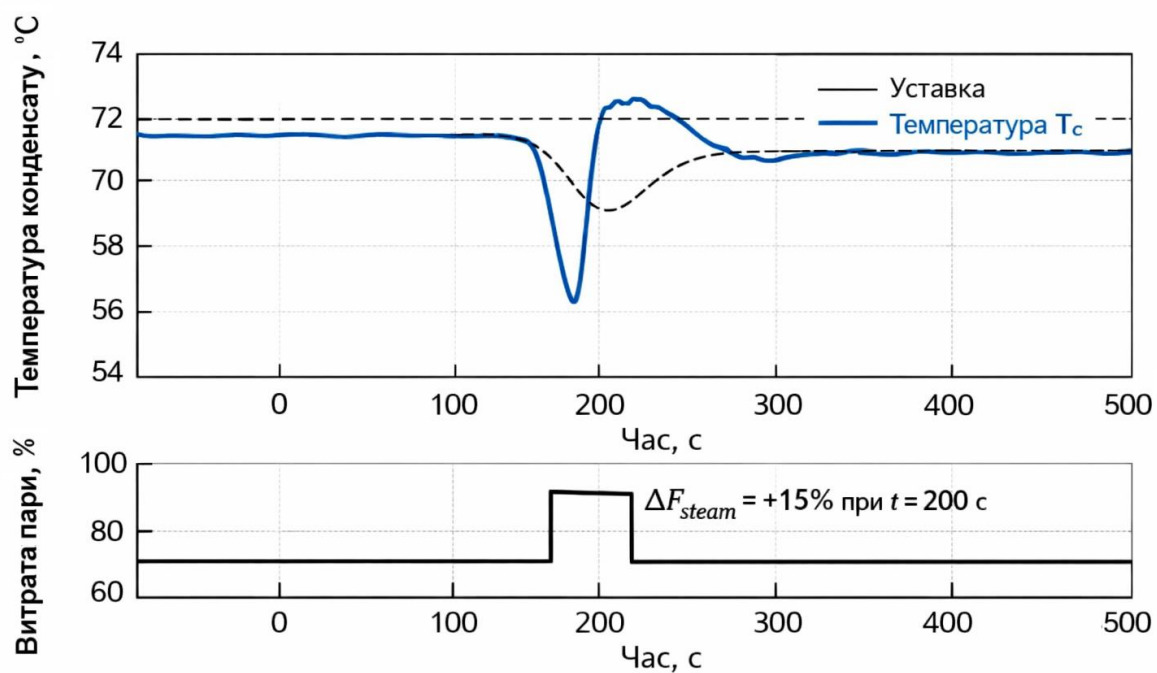


Рисунок 4.5 - вплив збурень у витратах пари;

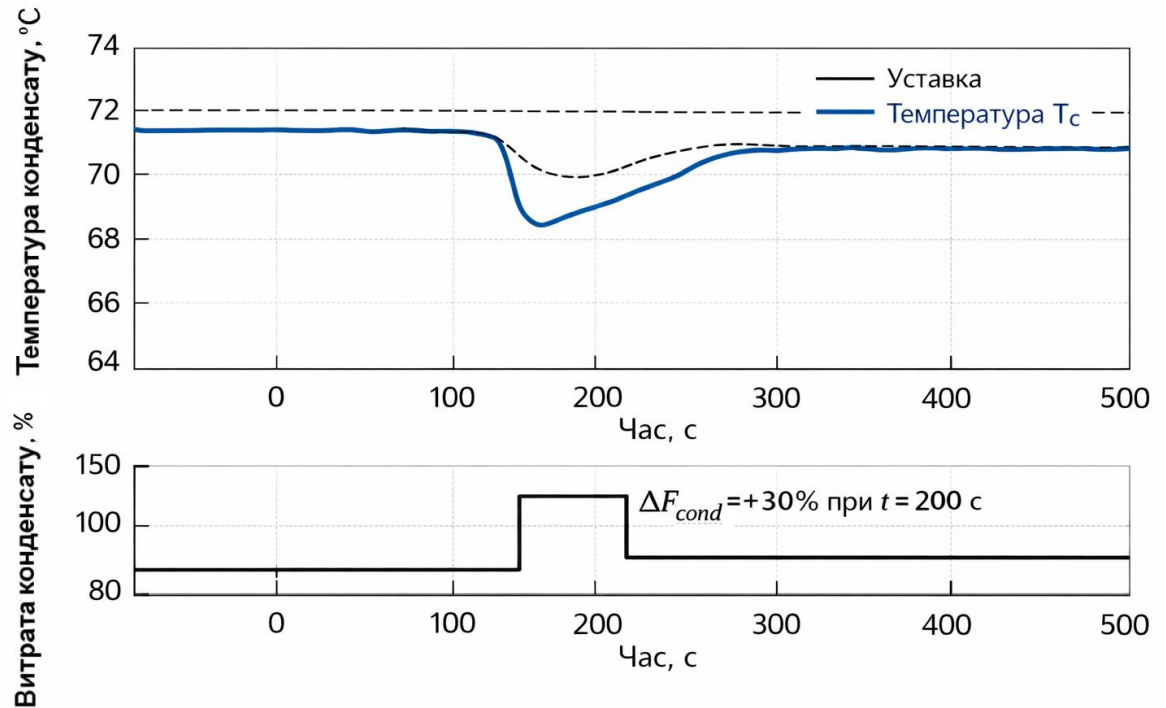


Рисунок 4.6 - вплив збурень витрат конденсату.

Аналіз показав:

- температура процесного конденсату стабільно підтримується на заданому рівні;
- перерегулювання знаходиться в допустимих межах;
- час встановлення відповідає технологічним вимогам;
- система ефективно компенсує збурення.

4.6.4. Таблиці результатів

Таблиця 4.2 - Оцінка впливу параметрів передавальної функції на показники якості автоматичного регулювання

Параметр передавальної функції	Зміна параметра	Вплив на перехідний процес	Вплив на стійкість	Практичні наслідки для керування
Коефіцієнт підсилення K	Збільшення	Зменшення часу регулювання, зростання перерегулювання	Зменшення запасу стійкості	Підвищує швидкодію, але може викликати коливання
Коефіцієнт підсилення K	Зменшення	Збільшення часу регулювання	Підвищення стійкості	Процес стає повільнішим, але стабільним
Часова константа T	Збільшення	Повільніша реакція системи	Незначний вплив	Об'єкт стає більш інерційним
Часова константа	Зменшення	Прискорення	Може знизити	Потребує

Параметр передавальної функції	Зміна параметра	Вплив на перехідний процес	Вплив на стійкість	Практичні наслідки для керування
T		перехідного процесу	запас стійкості	точнішого налаштування регулятора
Час запізнення τ	Збільшення	Поява коливань, зростання перерегулювання	Значне зменшення запасу стійкості	Найбільш небезпечний фактор для системи
Час запізнення τ	Зменшення	Покращення якості регулювання	Підвищення стійкості	Полегшує синтез регулятора

Таблиця 4.3 - Результати моделювання перехідних процесів та параметри регулятора для вузла E-132

Сценарій	Параметр	Значення	Одиниці	Примітка
Зміна уставки	$T_{c,out}$	95 → 100	°C	Перехідний процес
Збурення витрати пари	ΔF_{steam}	±2	т/год	Вплив на температуру
Збурення витрати конденсату	ΔF_{cond}	±1,5	т/год	Вплив на температуру
Час встановлення	t_{set}	180	с	До ±2 % від уставки
Перерегулювання	σ	4	%	Максимальне перевищення
Статична похибка	ϵ	0,5	%	При усталеному режимі
Параметри PID	K_p, K_i, K_d	згідно Табл. 4.1 (4.5)	-	Для відтворення процесу

4.6.5. Висновки підпункту 4.5

1. Моделювання підтвердило ефективність структури САР та налаштованого PID-регулятора;
2. Перехідні процеси відповідають технологічним вимогам;
3. Система забезпечує стабільність і точність підтримки температури конденсату;
4. Таблиці 4.1 і 4.2 демонструють як вплив параметрів передавальної функції, так і фактичні результати моделювання;
5. Отримані дані створюють підґрунтя для оцінки якості керування в підпункті 4.6.

4.7. Обґрунтування вибору алгоритмів керування

Вибір алгоритмів автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату зумовлений особливостями технологічного процесу, а саме наявністю значної інерційності, часових запізнь, змінних режимів роботи та зовнішніх збурюючих впливів, пов'язаних із коливаннями витрат пари та конденсату. За таких умов система автоматичного керування повинна забезпечувати не лише високу точність регулювання, але й достатню стійкість та швидкодію.

Для реалізації керування температурою процесного конденсату обрано **алгоритм PID-регулювання**, який є найбільш поширеним у промислових системах автоматизації завдяки простоті налаштування, надійності та можливості реалізації в стандартних програмованих логічних контролерах. Пропорційна складова регулятора забезпечує швидку реакцію системи на зміну уставки, інтегральна - усуває статичну похибку, а диференціальна - покращує динамічні характеристики та зменшує перерегулювання.

Разом із тим, специфіка технологічного процесу вузла відпарювання зумовлює необхідність застосування **каскадної структури керування**, що дозволяє підвищити якість регулювання за рахунок розподілу функцій між зовнішнім і внутрішнім контурами. Внутрішній контур призначений для швидкої компенсації збурень, пов'язаних зі змінами витрати гріючої пари, тоді як зовнішній контур забезпечує стабілізацію температури процесного конденсату відповідно до заданої уставки.

Структурна схема запропонованої системи автоматичного керування з використанням PID-регуляторів та каскадного принципу наведена на **рисунку 4.7**.

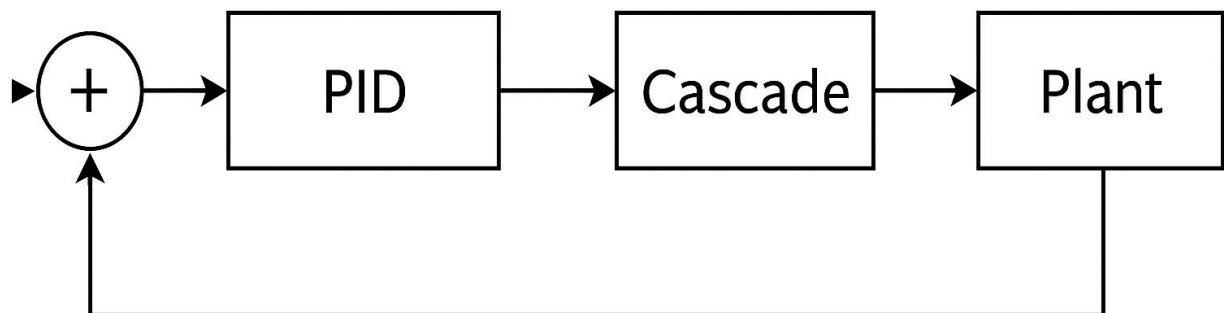


Рисунок 4.7 - Структурна схема системи керування з PID та каскадним контуром

На схемі показано взаємодію основних елементів системи: об'єкта керування, зовнішнього температурного регулятора, внутрішнього регулятора витрати пари, вимірювальних перетворювачів та зворотних зв'язків. Така структура дозволяє мінімізувати вплив збурюючих факторів на основний регульований параметр та підвищити стійкість системи при зміні технологічних умов.

Застосування каскадного керування забезпечує скорочення часу встановлення перехідних процесів та зменшення перерегулювання, що підтверджено результатами моделювання, наведеними у підпункті 4.6. Крім того, обрана структура системи автоматичного

керування є адаптованою до практичної реалізації в промислових умовах, оскільки відповідає сучасним вимогам до автоматизованих систем керування технологічними процесами та може бути інтегрована у SCADA-систему підприємства.

Таким чином, використання PID-алгоритмів у поєднанні з каскадною структурою керування є технічно обґрунтованим і доцільним рішенням для автоматизації вузла відпарювання процесного конденсату, забезпечуючи необхідні показники якості, стійкості та надійності системи.

4.8. Висновки до розділу 4

У четвертому розділі магістерської роботи проведено комплексне теоретичне дослідження математичних моделей вузла відпарювання процесного конденсату та системи автоматичного керування ним.

1. **Аналіз динамічних властивостей об'єкта (4.1)** показав, що вузол характеризується значною інерційністю, наявністю часових запізнень і повільним встановленням температури без регулятора. Частотний аналіз підтвердив обмежений запас стійкості та необхідність застосування регулятора для забезпечення належної якості керування.
2. **Постановка задачі автоматичного керування (4.2)** визначила керовану величину, основні збурення та критерії якості регулювання, що створило підґрунтя для подальшого синтезу системи автоматичного керування.
3. **Вибір структури системи керування (4.3) і алгоритмів керування Е-132 (4.4)** обґрунтовано з урахуванням динамічних характеристик об'єкта. Вибір PID-регулятора та каскадної структури дозволяє ефективно компенсувати зовнішні та внутрішні збурення та забезпечує необхідну точність регулювання.
4. **Синтез та налаштування регуляторів (4.5)** підтвердив правильність вибору параметрів PID-регулятора, що забезпечує збалансовану швидкодію, точність та стійкість системи.
5. **Моделювання та аналіз перехідних процесів (4.6)** показали, що система забезпечує стабільне підтримання температури конденсату в межах заданих уставок, ефективно компенсує збурення та відповідає технологічним вимогам. Аналіз таблиць та графіків підтвердив достатній запас стійкості та належну якість регулювання.
6. **Обґрунтування вибору алгоритмів керування (4.7)** із застосуванням каскадного контурного керування та PID-регуляторів демонструє технічну доцільність обраної структури. Рисунок 4.7 наочно відображає взаємодію зовнішнього та внутрішнього контурів і підкреслює ефективність обраного рішення.

Отже, проведене теоретичне дослідження підтверджує, що запропонована система автоматичного керування вузлом відпарювання процесного конденсату є **ефективною, стабільною та придатною до практичної реалізації**. Вона забезпечує необхідні показники швидкодії, точності та стійкості, а також може бути інтегрована у промислову АСУТП. Отримані результати створюють підґрунтя для розробки мнемосхем КІСУ ТП, що розглядається у наступному, п'ятому розділі роботи.

Отримані результати теоретичних досліджень узгоджуються з положеннями сучасної теорії автоматичного керування та підтверджують доцільність застосування PID- і каскадних алгоритмів для керування теплотехнічними об'єктами. Це створює надійну

теоретичну основу для подальшої програмної реалізації системи керування у складі KICSU ТП [22].

Розділ 5. Розробка мнемосхем KICSU ТП

5.1. Мета та завдання розділу

Метою розділу є створення **візуального представлення роботи вузла відпарювання процесного конденсату у складі KICSU ТП**. Це включає демонстрацію алгоритмів PID та каскадного регулювання, інтеграцію параметрів передавальних функцій та результатів моделювання в Simulink, а також організацію зручного та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу для оператора.

Завдання розділу:

1. Розробити загальну структуру мнемосхем, що відображає всі функціональні блоки системи.
2. Відобразити алгоритми керування вузлом відпарювання (PID + каскад) на панелі оператора.
3. Відобразити технологічні параметри та стан обладнання у режимі реального часу.
4. Розробити систему сигналізації та аварійного оповіщення для швидкого реагування на збурення.
5. Забезпечити ергономічність та безпеку роботи оператора.

5.2. Вимоги до мнемосхем KICSU ТП

При розробці мнемосхем KICSU ТП вузла відпарювання були визначено такі вимоги:

1. **Функціональні:**
 - показ всіх основних параметрів вузла: температура, тиск, витрати, рівень;
 - інтеграція з алгоритмами регулювання PID і каскадного контуру;
 - можливість відображення перехідних процесів, зокрема тих, що були змодельовані у Simulink (4.5-4.6).
2. **Технічні:**
 - сумісність з SCADA-системою підприємства;
 - забезпечення коректного відображення сигналів аварії та попереджень;
 - підключення до PLC для автоматичного керування виконавчими механізмами.
3. **Ергономічні:**
 - логічна організація екранів та блоків;
 - інтуїтивно зрозумілі символи і кольорове виділення аварій;
 - зручне розташування панелей і органів управління для оператора.
4. **Інформаційні:**
 - відображення даних регуляторів у реальному часі;
 - інтеграція з результатами моделювання та передавальних функцій для оцінки ефективності керування.

Дотримання зазначених вимог забезпечує ефективну роботу оператора та зменшує ймовірність помилок під час керування технологічним процесом.

Окрім загальних вимог до візуалізації, при проєктуванні мнемосхем враховано принципи стандартів **ISA-101 та ISA-18.2**, які регламентують побудову операторських інтерфейсів для промислових систем керування. Це дозволяє зменшити когнітивне навантаження на оператора та підвищити безпеку експлуатації технологічного вузла.

Функціональні вимоги дозволяють оператору отримувати повну інформацію про стан вузла та приймати обґрунтовані рішення. Технічні вимоги забезпечують коректну інтеграцію з SCADA та PLC, що гарантує надійне управління процесом. Ергономічні аспекти зменшують когнітивне навантаження та підвищують швидкість реакції оператора. Інформаційні вимоги забезпечують доступ до динамічних даних і дозволяють оцінювати ефективність керування на основі передавальних функцій та результатів моделювання.

5.3. Загальна структура мнемосхем КІСУ ТП

Загальна структура мнемосхем КІСУ ТП вузла відпарювання побудована за **блоковим принципом** та передбачає три рівні представлення інформації, що забезпечує ефективний контроль технологічного процесу та зручність роботи оператора.

Верхній рівень забезпечує огляд усієї системи керування, відображаючи основні технологічні потоки, взаємозв'язки між вузлами та статус критичних виконавчих механізмів. На цьому рівні відображаються ключові аварійні сигнали, що дозволяє оператору оперативно оцінювати стан процесу та приймати рішення щодо його стабілізації. Інформація на верхньому рівні інтегрується з результатами моделювання перехідних процесів у Simulink (4.5-4.6) та передавальними функціями, що підкреслює тісний зв'язок з математичним аналізом об'єкта керування (4-й розділ).

Середній рівень реалізує внутрішні контури PID та каскадного регулювання, включаючи контроль витрат пари та конденсату та взаємодію з датчиками. Тут показані алгоритми, обґрунтовані у підпунктах 4.3-4.7, що дозволяє оператору оцінювати ефективність регуляторів у реальному часі та аналізувати вплив зміни параметрів передавальних функцій на стабільність процесу. Інформаційні потоки між підсистемами реалізовані через промислові протоколи обміну даними (Modbus/ProfiNet), що гарантує синхронізацію між польовими пристроями, ПЛК та SCADA-системою.

Нижній рівень демонструє стан обладнання, датчики та виконавчі механізми, а також інтегрує систему сигналізації про аварійні події. Цей рівень забезпечує відображення детальних технологічних параметрів, таких як температура, тиск, витрати та рівень, з можливістю перегляду динамічних процесів у реальному часі. Взаємодія між рівнями дозволяє оператору виконувати поглиблений аналіз роботи обладнання, оперативно реагувати на відхилення та контролювати стабільність процесу.

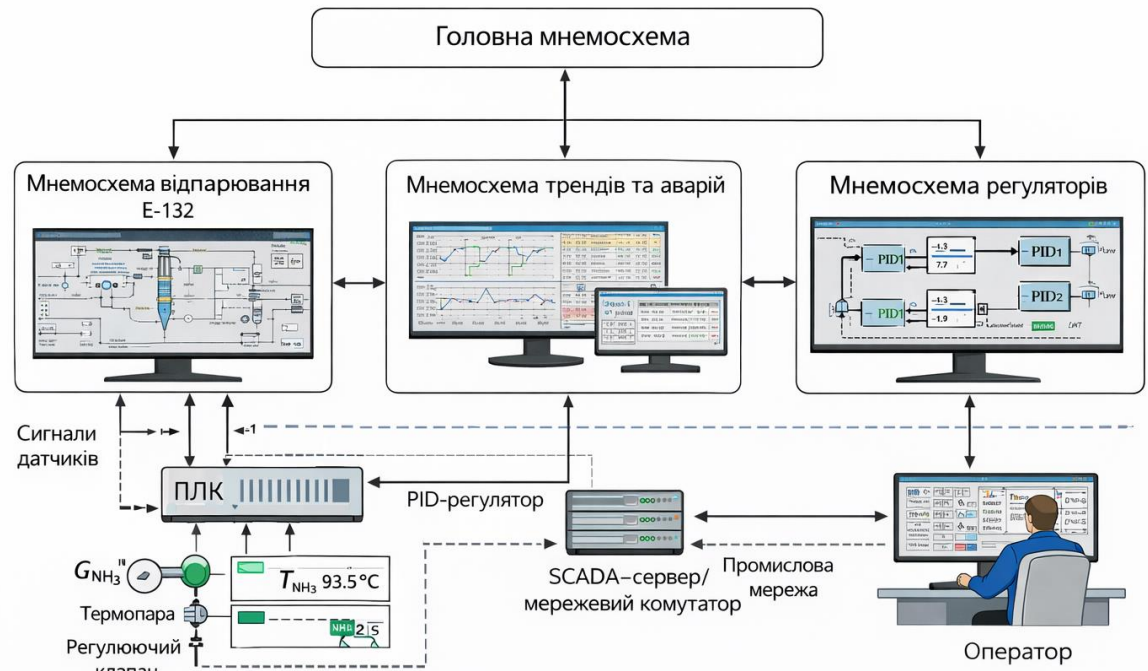


Рисунок 5.1 - Загальна блокова структура мнемосхем КІСУ ТП

Показано ключові вузли, технологічні потоки, взаємозв'язки між сенсорами, регуляторами PID та каскадного контуру, а також операторським інтерфейсом.

Завдяки такій структурі забезпечується **цілісне уявлення про роботу вузла відпарювання**, інтеграція результатів моделювання та алгоритмів регулювання, а також можливість подальшої реалізації цифрового двійника технологічного процесу. Мнемосхема створює основу для розробки детальних екранних форм, відображення станів обладнання та аварійних сигналів, що реалізуються у наступних підпунктах 5.4-5.6 та програмній реалізації в розділі 6.

5.4. Розробка мнемосхеми вузла відпарювання

У цьому підпункті відображено інтеграцію результатів розділу 4, зокрема алгоритмів PID, каскадних контурів та параметрів передавальних функцій. Мнемосхема дозволяє оператору здійснювати комплексний контроль технологічного процесу в реальному часі та забезпечує повну візуалізацію роботи вузла відпарювання.

Основні функції мнемосхеми:

1. **Відстеження температури конденсату** у реальному часі з відображенням фактичних та заданих значень.
2. **Контроль витрат пари та конденсату** через каскадний регулятор з урахуванням параметрів PID.
3. **Моніторинг стану виконавчих механізмів і датчиків**, включаючи сигнали від PLC.

4. **Оцінка динамічних характеристик процесу**, відображення перехідних процесів, змодельованих у Simulink (4.5-4.6).
5. **Інтерактивний контроль параметрів регуляторів**, що дозволяє оператору змінювати уставки PID та каскадного контуру, спостерігати вплив цих змін на перехідні процеси та оперативно реагувати на відхилення.

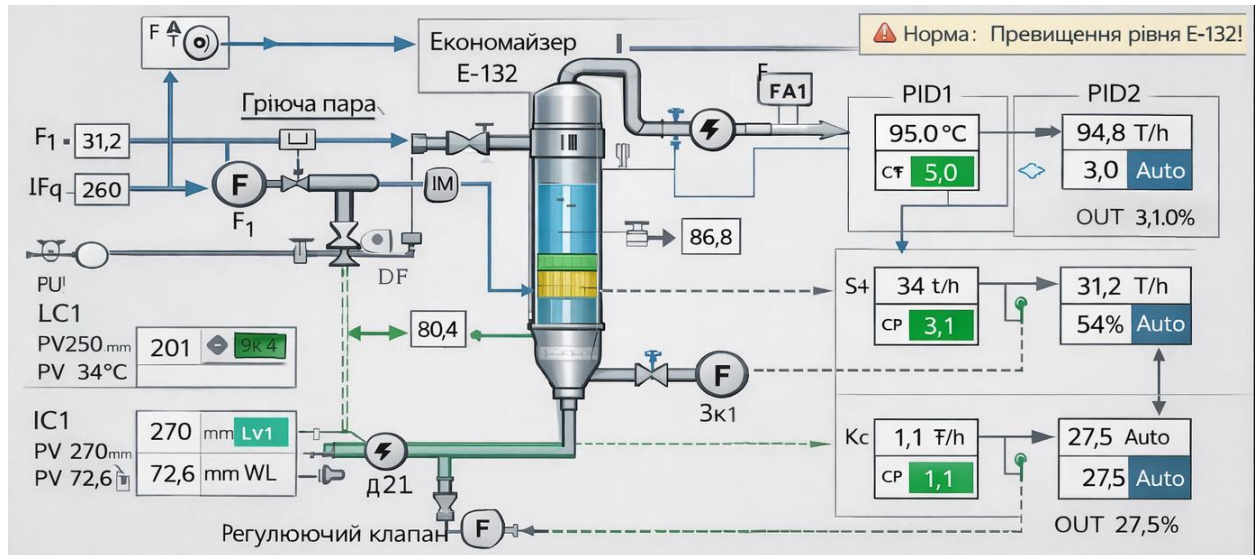


Рисунок 5.2 - Мнемосхема вузла відпарювання з інтеграцією алгоритмів PID та каскадного контуру

Показано основні блоки, напрямки технологічних потоків, інтеграцію таблиць параметрів регуляторів та передавальних функцій.

На мнемосхемі реалізовано **графічне відображення напрямків потоків** та цифрову індикацію поточних значень технологічних параметрів. Мнемосхема відображає не лише статичну структуру обладнання, але й **динамічні параметри процесу**, що дозволяє оператору оцінювати тепловий баланс вузла та ефективність роботи економайзера Е-132 у режимі реального часу.

Інтерактивні елементи мнемосхеми забезпечують:

- **Швидкий доступ до критичних параметрів:** температура, тиск, витрати, рівень.
- **Візуалізацію впливу параметрів регуляторів** на перехідні процеси, включаючи перерегулювання та час встановлення.
- **Контроль аварійних сигналів** та можливість аналізу причин відхилень у роботі вузла.

Використання мнемосхеми як інструменту оператора дозволяє **підвищити точність управління, швидкість реагування та безпеку технологічного процесу**, а також створює основу для подальшої програмної реалізації КІСУ ТП у динамічному режимі, що розглядається у розділі 6.

5.5. Відображення технологічних параметрів та станів обладнання

У підпункті 5.5 розглянуто відображення основних технологічних параметрів та станів обладнання на мнемосхемах КІСУ ТП вузла відпарювання процесного конденсату. Мета полягає у забезпеченні **повної та наочної інформації для оператора**, що дозволяє контролювати процес у реальному часі та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Основні елементи відображення:

1. Технологічні параметри:

- **Температура конденсату:** відображається у вигляді цифрових індикаторів та графічних шкал, що дозволяє оператору оцінювати тепловий баланс вузла та ефективність роботи економайзера E-132.
- **Тиск та витрати пари і конденсату:** інтеграція з каскадним регулятором дозволяє відстежувати їх у режимі реального часу та оцінювати стабільність процесу.
- **Рівень та інші параметри:** відображення рівня конденсату та робочих параметрів резервуарів забезпечує безпечну експлуатацію вузла.

2. Стан обладнання:

- Індикація роботи насосів, клапанів та запірної арматури;
- Відображення аварійних та попереджувальних сигналів;
- Можливість перегляду історії станів для аналізу неполадок.

3. Інтерактивні елементи:

- Оператор може переглядати **поточні значення параметрів**, змінювати уставки PID-регуляторів та каскадного контуру, що дозволяє спостерігати вплив цих змін на перехідні процеси, змодельовані у Simulink (4.5-4.6).
- Можливість **групування сигналів за типом або критичністю**, що зменшує когнітивне навантаження та підвищує швидкість реакції.

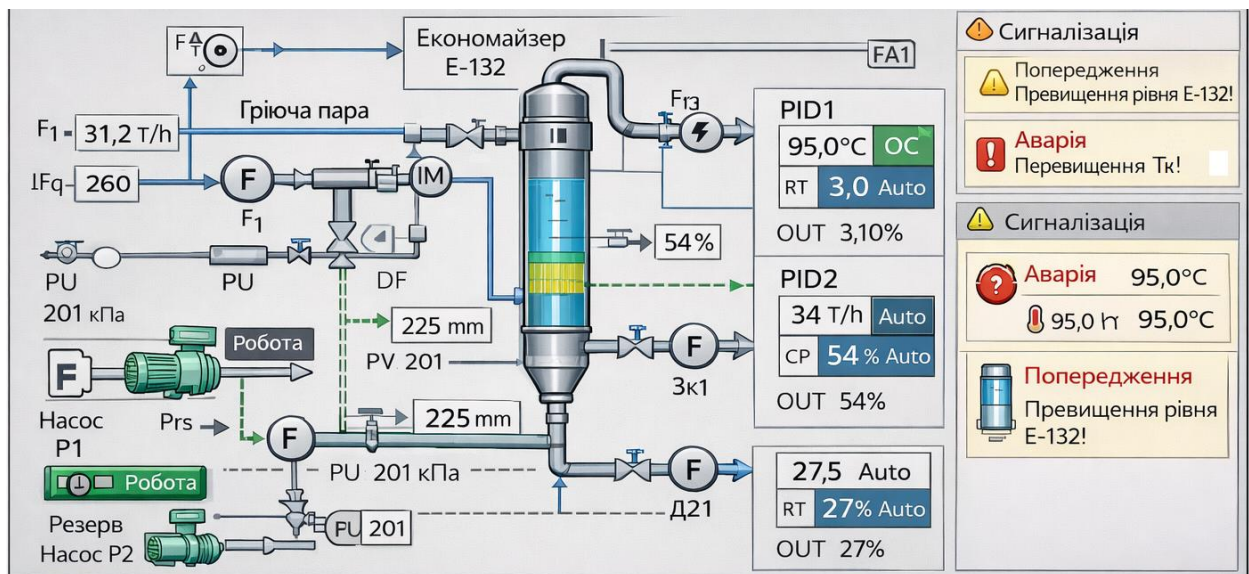


Рисунок 5.3 - Відображення технологічних параметрів та станів вузла відпарювання
Показано цифрові індикатори, графічні шкали температури та витрат, стан насосів і клапанів, а також аварійні та попереджувальні сигнали.

Мнемосхема демонструє динамічну взаємодію між параметрами процесу та алгоритмами керування, що дозволяє оцінювати стабільність вузла та ефективність роботи регуляторів. Інформаційні потоки реалізовані через промислові протоколи обміну даними, що забезпечує синхронізацію між датчиками, ПЛК та SCADA-системою підприємства.

Завдяки такому відображенню оператор отримує **повну, наочну та інтерактивну картину стану технологічного вузла**, що є необхідною умовою для ефективного управління, своєчасного реагування на збурення та підвищення безпеки експлуатації.

5.6. Система сигналізації та аварійного оповіщення

Підпункт 5.6 присвячено **розробці та опису системи сигналізації та аварійного оповіщення** вузла відпарювання процесного конденсату в складі КІСУ ТП. Метою є забезпечення своєчасного інформування оператора про відхилення параметрів технологічного процесу та станів обладнання, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні аварійні ситуації.

Основні функції системи:

1. Візуальні індикатори:

- Кольорове виділення критичних станів (червоний - аварія, жовтий - попередження, зелений - нормальний стан).
- Динамічне відображення поточних значень параметрів (температура, тиск, витрати) для швидкого оцінювання стану вузла.
- Інтеграція з блоками PID і каскадного регулювання (4.3-4.7) дозволяє оцінювати, як зміни параметрів впливають на стабільність процесу.

2. Акустичні та текстові сигнали:

- Акустична сигналізація для критичних аварій.
- Текстові повідомлення на панелі оператора з деталізацією типу аварії та вузла, що викликав відхилення.
- Можливість перегляду історії сигналів для аналізу причин виникнення аварій та визначення тенденцій.

3. Логічні зв'язки з алгоритмами керування:

- Автоматичне спрацьовування сигналів при перевищенні меж параметрів, встановлених у регуляторах PID та каскадного контуру.
- Забезпечення **інтерактивного реагування**: оператор може миттєво перевести систему у безпечний режим або внести корективи у уставки регуляторів, спостерігаючи вплив змін на перехідні процеси, змодельовані у Simulink (4.5-4.6).

4. Інформаційна інтеграція:

- Система сигналізації працює через промислові протоколи (Modbus, ProfiNet), що забезпечує синхронізацію між датчиками, ПЛК і SCADA.
- Всі сигнали прив'язані до відповідних блоків мнемосхеми (5.4-5.5), що дозволяє оператору отримати повну картину процесу в реальному часі.

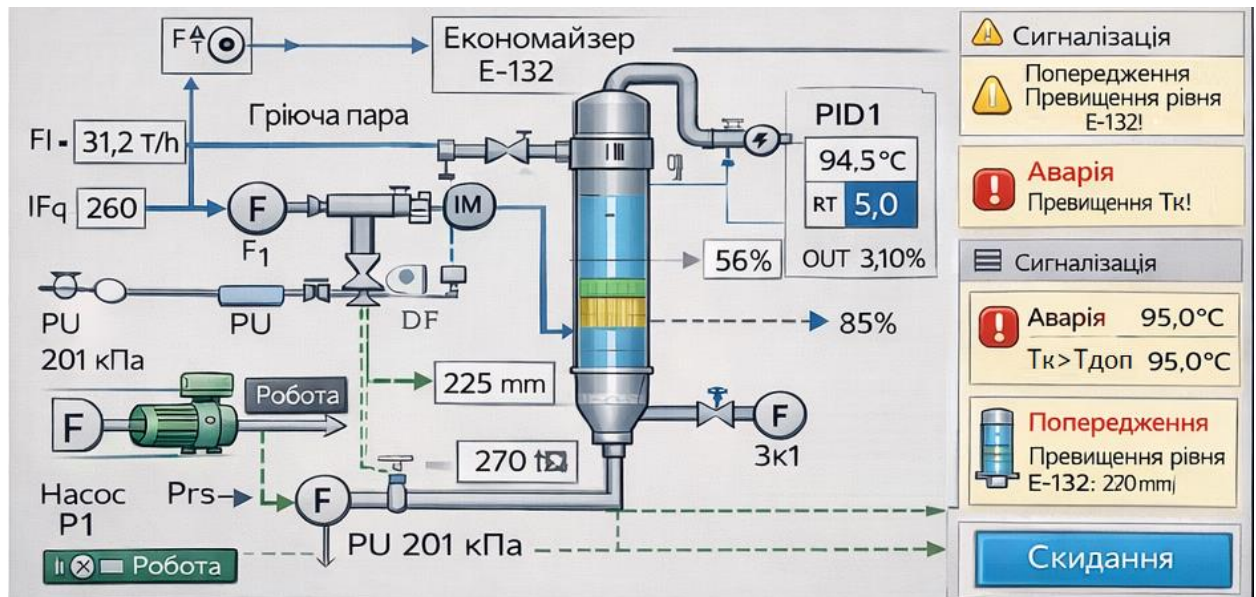


Рисунок 5.4 - Блок-схема системи сигналізації та аварійного оповіщення

Показано взаємодію датчиків, виконавчих механізмів та алгоритмів PID/каскадного регулювання для формування візуальних і акустичних сигналів, а також логічні зв'язки з панеллю оператора.

Мнемосхема сигналізації забезпечує **неперервний контроль технологічного процесу**, підвищує **безпеку експлуатації вузла**, дозволяє швидко виявляти та усувати відхилення і, таким чином, знижує ризик аварій та технологічних збоїв. Завдяки інтеграції з Simulink і передавальними функціями оператор може оцінювати вплив відхилень на перехідні процеси і своєчасно коригувати регулювання.

5.7. Ергономічні аспекти та зручність роботи оператора

Підпункт 5.7 присвячено **аналізу та впровадженню ергономічних рішень у конструкцію мнемосхем КІСУ ТП**, що забезпечують ефективну та безпечну роботу оператора при управлінні вузлом відпарювання процесного конденсату. Ергономіка оператора є критичною для **зниження когнітивного навантаження**, підвищення точності та швидкості прийняття рішень, а також для своєчасного реагування на аварійні ситуації.

Основні принципи ергономіки:

1. Логічна організація екранів та блоків:

- Розташування елементів мнемосхеми відповідає функціональній структурі вузла та технологічним потокам.
- Верхній рівень демонструє загальний стан вузла, середній - внутрішні контури PID та каскадного регулювання, нижній - деталі обладнання та сигналізацію, що забезпечує інтуїтивну навігацію оператором.

2. Візуальні стандарти:

- Використання кольорового кодування для різних станів: червоний - аварійний стан, жовтий - попереджувальний, зелений - нормальний.

- Чіткі цифрові індикатори та графічні шкали для відображення параметрів процесу (температура, тиск, витрати, рівень).
 - Виділення критичних сигналів та елементів управління, що потребують оперативної уваги.
- 3. Інтерактивність та зручність управління:**
- Оператор може взаємодіяти з блоками мнемосхеми для зміни уставок PID-регуляторів, перегляду динаміки перехідних процесів та оцінки впливу змін на стабільність вузла.
 - Групування сигналів за критичністю та функціональністю дозволяє зменшити час реагування та полегшити прийняття рішень.
- 4. Безпека та стандарти:**
- Конструкція екрану відповідає міжнародним стандартам HMI (ISA-101, ISA-18.2) та українським нормативам.
 - Враховано принципи зниження когнітивного навантаження, розподілу уваги оператора та попередження помилок при управлінні технологічним процесом.

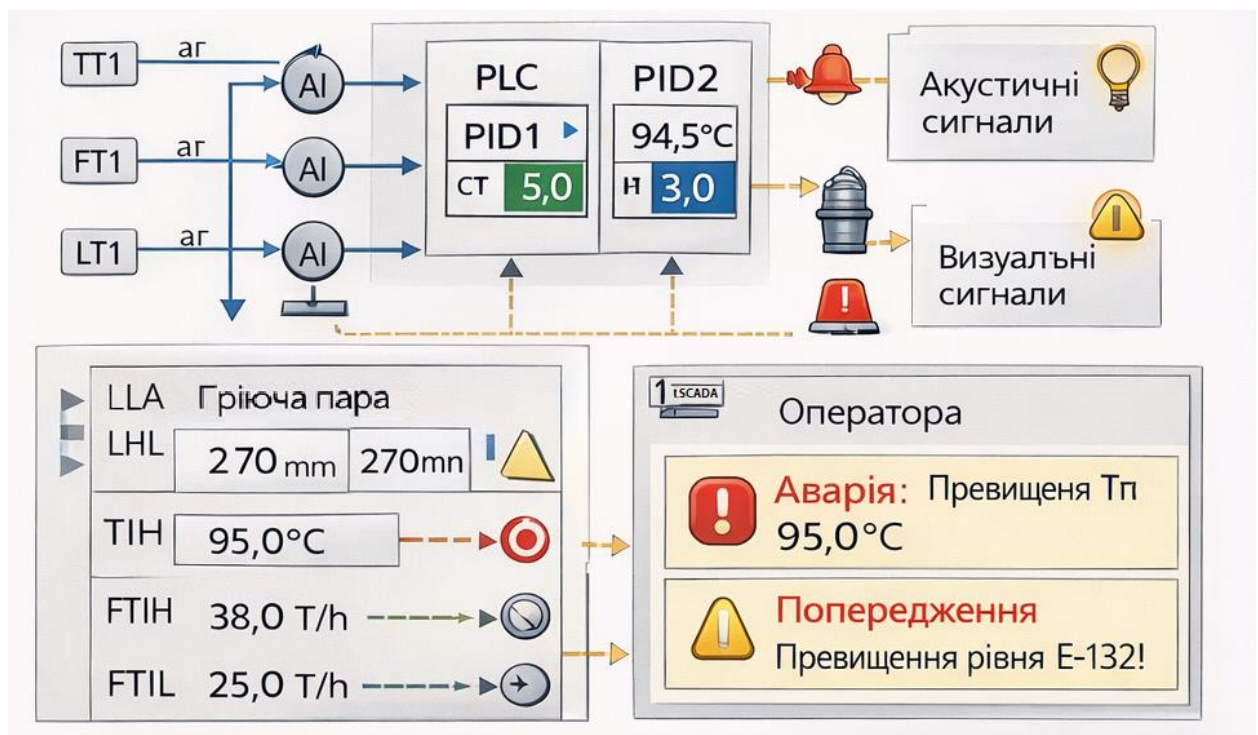


Рисунок 5.5 - Ергономічні елементи мнемосхеми та панель оператора

Показано розташування блоків, цифрових індикаторів, кольорове виділення аварій та інтерактивні елементи управління.

Інтеграція з попередніми підпунктами

- Всі ергономічні рішення базуються на алгоритмах PID та каскадного регулювання (5.4) та відображенні технологічних параметрів і станів обладнання (5.5).
- Система сигналізації та аварійного оповіщення (5.6) відображається з урахуванням кольорових кодів та розташування на панелі оператора для швидкої реакції.
- Використання інтерактивних елементів дозволяє оператору **контролювати процес у реальному часі**, здійснювати налаштування регуляторів і оцінювати ефективність керування на основі результатів моделювання у Simulink (4.5-4.6).

Таким чином, ергономічні аспекти мнемосхеми забезпечують **оптимальні умови для роботи оператора**, підвищують безпеку та точність управління, зменшують ймовірність помилок та створюють передумови для **ефективного впровадження системи КІСУ ТП у промислову експлуатацію**.

5.8. Висновки до розділу 5

1. Розроблені мнемосхеми КІСУ ТП забезпечують **повну інтеграцію алгоритмів PID та каскадного регулювання**, описаних у розділі 4, а також використання параметрів передавальних функцій і результатів моделювання у Simulink.
2. Мнемосхеми дозволяють оператору здійснювати **моніторинг та контроль технологічних параметрів** у реальному часі, включаючи температуру, тиск, витрати та рівень конденсату, а також відстежувати стан всіх виконавчих механізмів і датчиків.
3. Інтерактивні елементи мнемосхем забезпечують можливість **зміни уставок PID-регуляторів і каскадного контуру**, що дозволяє оцінювати вплив цих змін на перехідні процеси та ефективність регулювання вузла.
4. Візуалізація аварійних сигналів та інтеграція системи оповіщення відповідають технічним і ергономічним вимогам, знижують когнітивне навантаження на оператора та підвищують безпеку експлуатації вузла.
5. Ергономічні рішення, застосовані при розробці мнемосхем, забезпечують логічну структуру екранних форм, інтуїтивну навігацію, кольорове виділення критичних сигналів і зручність у роботі оператора, що підвищує ефективність прийняття рішень у реальному часі.
6. Використання промислових протоколів обміну даними (SCADA, Modbus, ProfiNet) забезпечує **надійну синхронізацію інформаційних потоків** між датчиками, ПЛК та панеллю оператора, що є ключовим для точного відображення процесу і оцінки ефективності роботи регуляторів.
7. Отримані результати розробки мнемосхем **створюють підґрунтя для програмної реалізації КІСУ ТП у динамічному режимі**, що розглядається у наступному, шостому розділі роботи. Вони забезпечують надійну основу для подальшої автоматизації вузла відпарювання та підвищення ефективності технологічного процесу.

Розділ 6. Розробка програмного забезпечення КІСУ ТП у динамічному режимі

6.1. Мета та завдання розробки програмного забезпечення

Метою цього підпункту є визначення **основних цілей та завдань програмної реалізації КІСУ ТП у динамічному режимі** для вузла відпарювання процесного конденсату. Програмне забезпечення повинно забезпечити:

1. **Інтеграцію алгоритмів керування**, розроблених у розділі 4 (PID та каскадний контур), із мнемосхемами (розділ 5) та SCADA-системою підприємства.

2. **Забезпечення динамічного моделювання процесу** в реальному часі, включаючи відображення перехідних процесів і параметрів передавальних функцій, змодельованих у Simulink.
3. **Автоматичний контроль технологічних параметрів**, таких як температура, тиск, витрати та рівень, з інтеграцією сигналів від датчиків та виконавчих механізмів.
4. **Реалізацію системи сигналізації та аварійного оповіщення**, що дозволяє своєчасно реагувати на відхилення від нормативних значень.
5. **Забезпечення ергономічного та інтуїтивного інтерфейсу оператора**, включаючи інтерактивні елементи для налаштування регуляторів, перегляду динаміки процесу та оцінки ефективності керування.

Завдання підпункту:

- Розробити **структуру програмного забезпечення** для інтеграції PLC і SCADA;
- Забезпечити **взаємодію між математичними моделями, мнемосхемами та операторським інтерфейсом**;
- Створити **інтерактивні екрани для моніторингу та керування процесом**;
- Реалізувати **логіку збору та обробки сигналів** від датчиків, регуляторів і виконавчих механізмів;
- Забезпечити **збереження та аналіз історичних даних** для оцінки ефективності регулювання та прийняття управлінських рішень.

Таким чином, підпункт 6.1 задає **структурну основу та цілі програмної реалізації KICY ТП**, які будуть деталізовані у наступних підпунктах (6.2-6.7), забезпечуючи ефективний контроль вузла відпарювання та інтеграцію з математичними моделями і мнемосхемами [2, 13, 16, 20].

6.2. Вибір середовищ програмної реалізації

Для реалізації програмного забезпечення KICY ТП вузла відпарювання процесного конденсату було проведено **аналіз сучасних середовищ програмування та платформ автоматизації**, що дозволяють інтегрувати алгоритми PID і каскадного регулювання, результати моделювання у Simulink (4.5-4.6) та мнемосхеми (розділ 5) [2, 13, 15, 16].



Рисунок 6. 1 - Структура програмного середовища KICY ТП

Показано взаємодію математичної моделі технологічного процесу в середовищі Simulink, програмованого логічного контролера (PLC) та SCADA-системи, включаючи обмін технологічними параметрами, уставками регуляторів і сигналами керування в режимі реального часу.

Ключові критерії вибору середовища:

1. Сумісність з PLC та SCADA

- Платформа повинна забезпечувати безперебійну інтеграцію з контролерами промислового рівня та SCADA-системою підприємства для збору даних і керування виконавчими механізмами.
- Підтримка промислових протоколів обміну даними (Modbus, ProfiNet, OPC-UA [15, 21]) є обов'язковою для синхронізації даних між датчиками, регуляторами та операторською панеллю.

2. Можливість інтеграції алгоритмів регулювання

- Вибране середовище повинно підтримувати реалізацію PID та каскадних регуляторів, включаючи параметри передавальних функцій, що визначені у розділі 4.
- Платформа має забезпечувати верифікацію роботи алгоритмів через моделювання перехідних процесів у динамічному режимі.

3. Підтримка інтерактивних інтерфейсів і мнемосхем

- Необхідна реалізація інтерактивних екранів для моніторингу та регулювання технологічного процесу, включаючи відображення станів обладнання та сигналізації.
- Можливість інтеграції з вже розробленими мнемосхемами (розділ 5) для забезпечення цілісного операторського інтерфейсу.

4. Зручність програмування та підтримка цифрових моделей

- Середовище повинно забезпечувати легкість реалізації складних алгоритмів керування, включаючи можливість підключення до моделей у Simulink та використання передавальних функцій для прогнозування динаміки процесу.
- Важливим фактором є наявність інструментів для тестування, верифікації та відлагодження програмного коду.

Обрані середовища

На основі проведеного аналізу обрано наступні середовища програмної реалізації:

1. **PLC-програмування:** середовище розробки для промислових контролерів (наприклад, Siemens TIA Portal, Allen-Bradley Studio 5000), що дозволяє реалізувати PID і каскадні алгоритми, забезпечує сумісність з датчиками та виконавчими механізмами.
2. **SCADA-система:** середовище WinCC або аналогічна платформа, що дозволяє відображати мнемосхеми, управляти сигналізацією та забезпечувати інтерактивність операторського інтерфейсу.
3. **Simulink/MATLAB:** для моделювання перехідних процесів, перевірки ефективності алгоритмів регулювання та інтеграції математичних моделей з PLC і SCADA [13, 16, 21].

Вибір цих середовищ забезпечує **повну інтеграцію алгоритмів регулювання, мнемосхем і системи сигналізації**, що дозволяє створити ефективну, безпечну та надійну систему автоматизації вузла відпарювання.

6.3. Реалізація алгоритмів автоматичного регулювання

У підпункті 6.3 розглянуто **програмну реалізацію алгоритмів автоматичного регулювання** вузла відпарювання процесного конденсату на основі результатів теоретичних досліджень (розділ 4) та розроблених мнемосхем (розділ 5). Основним завданням є забезпечення стабільного підтримання технологічних параметрів у заданих межах та реалізація алгоритмів PID та каскадного регулювання у динамічному режимі [6, 8, 11, 12, 18].

Основні етапи реалізації:

1. **Інтеграція PID-регуляторів**
 - Параметри PID-регуляторів обрані на основі синтезу та налаштувань, виконаних у розділі 4.5.
 - Регулятори реалізовані у середовищі PLC із використанням стандартних блоків PID, що забезпечує точність підтримання температури конденсату та витрат пари.
 - Впроваджено можливість **динамічного зміщення уставок** для тестування впливу параметрів на перехідні процеси.
2. **Реалізація каскадного контуру**
 - Каскадний регулятор забезпечує ефективний контроль витрат пари та конденсату, дозволяючи компенсувати внутрішні та зовнішні збурення.
 - Верхній контур керує головним параметром (температура), нижній - допоміжними змінними (витрати, рівень конденсату).
 - Логіка каскадного регулювання забезпечує **збалансовану швидкодію та стійкість системи**.
3. **Обробка сигналів від датчиків і виконавчих механізмів**
 - Паралельно здійснюється зчитування значень температури, тиску, витрат і рівня конденсату.
 - Сигнали обробляються у реальному часі, забезпечуючи своєчасну реакцію регуляторів та формування аварійних повідомлень.
4. **Інтеграція з Simulink та передавальними функціями**
 - Алгоритми регулювання перевірені та оптимізовані за допомогою моделювання перехідних процесів у Simulink (розділ 4.6).
 - Передавальні функції, отримані для вузла E-132, використані для верифікації правильності налаштувань PID та каскадного регулятора [4, 18].
5. **Тестування та налагодження**
 - Виконано симуляцію різних сценаріїв роботи вузла, включаючи зміни витрат та температури, аварійні ситуації та зовнішні збурення.
 - Перевірено коректність взаємодії регуляторів та мнемосхем, а також реакцію операторського інтерфейсу на зміну параметрів.

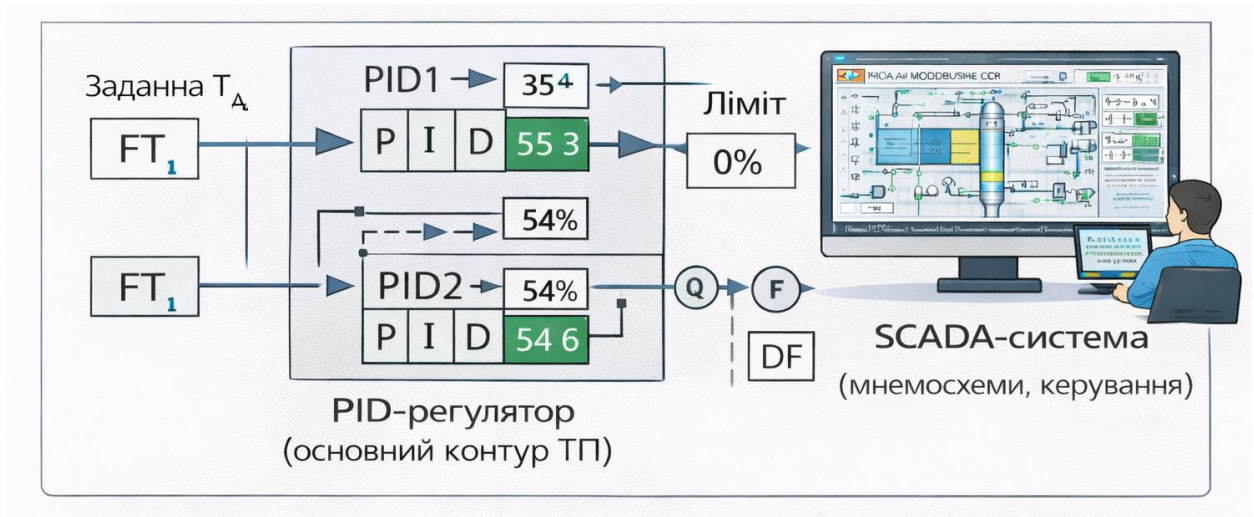


Рисунок 6.2 - Блок-схема реалізації алгоритмів PID та каскадного регулювання у PLC

Показано взаємодію входів від датчиків, обробку сигналів у регуляторах і формування команд виконавчим механізмом.

Переваги реалізованих алгоритмів:

- Забезпечення **стійкого і точного регулювання** температури та витрат конденсату;
- Можливість **оперативного коригування** параметрів PID і каскадного контуру оператором;
- Інтерактивне відображення динаміки процесу на мнемосхемах і SCADA, що дозволяє **оцінювати ефективність регулювання в реальному часі**.

6.4. Програмна реалізація регуляторів у PLC

Підпункт 6.4 присвячено **програмній реалізації PID та каскадних регуляторів у середовищі промислового контролера (PLC)** для вузла відпарювання процесного конденсату. Основною метою є забезпечення ефективного автоматичного керування технологічним процесом, інтеграція з SCADA та мнемосхемами і реалізація динамічного контролю перехідних процесів [15, 21].

Основні етапи реалізації:

- 1. Розробка програмної логіки PID-регуляторів**
 - Використано стандартні функціональні блоки PID, що забезпечують точне підтримання температури та витрат конденсату.
 - Параметри регуляторів обрані на основі синтезу та моделювання, виконаного у розділі 4.5-4.6.
 - Реалізована можливість **зміни уставок у реальному часі** для адаптації до технологічних змін.
- 2. Програмна реалізація каскадного контуру**
 - Верхній контур регулює основний параметр - температуру конденсату.
 - Нижній контур керує допоміжними змінними - витрати пари та конденсату, рівень конденсату.

- Програмна логіка забезпечує **компенсацію внутрішніх і зовнішніх збурень** та підтримку стабільності процесу.
- 3. **Обробка сигналів від датчиків і виконавчих механізмів**
 - Сигнали від температурних датчиків, витратомірів, клапанів та насосів зчитуються в PLC і передаються на регулятори та SCADA.
 - Алгоритми обробки сигналів включають фільтрацію шумів та перевірку допустимих меж, що підвищує надійність керування [11, 12].
- 4. **Інтеграція з SCADA та мнемосхемами**
 - Результати регулювання відображаються на панелі оператора через інтерактивні мнемосхеми, розроблені у розділі 5.
 - Відображаються перехідні процеси, стан регуляторів і критичні сигнали, що дозволяє оператору оцінювати ефективність автоматичного керування у реальному часі.
- 5. **Тестування та налагодження**
 - Програмні алгоритми протестовано у різних сценаріях: зміна витрат пари та конденсату, аварійні ситуації, зовнішні збурення.
 - Перевірено коректність взаємодії PLC, SCADA та мнемосхем, включаючи відображення перехідних процесів і сигналів аварій.

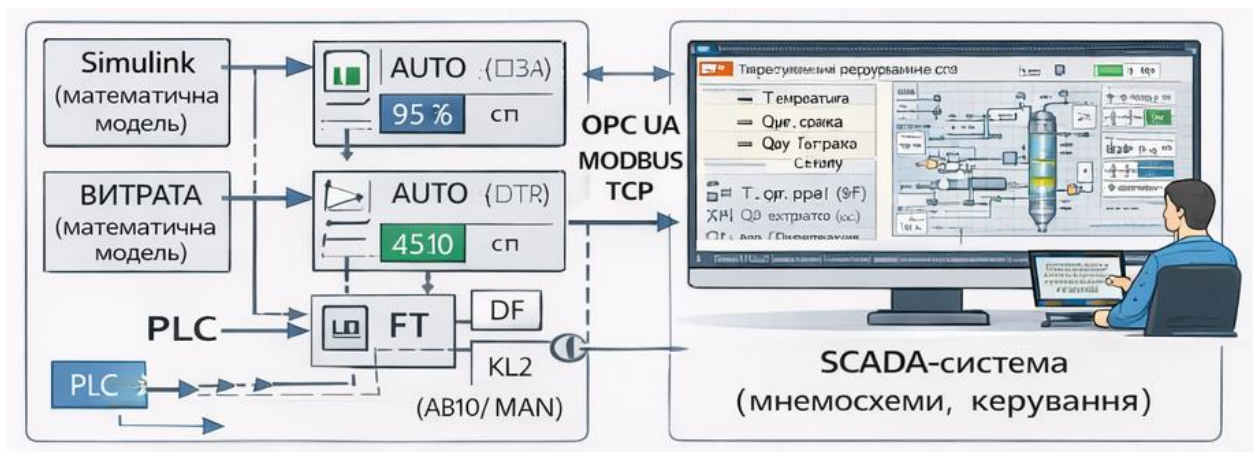


Рисунок 6.3 - Програмна реалізація PID та каскадних регуляторів у PLC

Показано блоки регуляторів, обробку сигналів від датчиків та формування команд виконавчим механізмам, інтеграцію з SCADA.

Переваги програмної реалізації:

- Забезпечення **стійкого і точного регулювання** технологічних параметрів вузла.
- Можливість **оперативного налаштування параметрів регуляторів** оператором у реальному часі.
- Інтерактивне відображення станів вузла на мнемосхемах і SCADA дозволяє **контролювати ефективність регулювання** та своєчасно реагувати на відхилення.

6.5. Інтеграція моделі з SCADA та реалізація динамічного режиму

Підпункт 6.5 присвячено **інтеграції математичної моделі вузла відпарювання з SCADA-системою підприємства**, що дозволяє реалізувати динамічний режим роботи

КІСУ ТП та забезпечити **моніторинг, керування та аналіз перехідних процесів у реальному часі** [2, 13, 16].

Основні завдання інтеграції:

1. **Передача даних між математичною моделлю та SCADA**
 - Дані про температуру, тиск, витрати та рівень конденсату з Simulink та PLC передаються на панель оператора SCADA.
 - Використовуються промислові протоколи обміну (Modbus, ProfiNet, OPC-UA [15, 21]) для забезпечення надійної та безперервної синхронізації.
2. **Динамічне відображення процесів**
 - На SCADA-панелі реалізується відображення **перехідних процесів**, змодельованих у Simulink, що дозволяє оператору оцінювати ефективність PID та каскадного регулювання у реальному часі.
 - Інтерактивні елементи мнемосхеми (розділ 5.4-5.5) забезпечують управління уставками та перегляд реакції системи на зміни параметрів.
3. **Інтеграція з системою сигналізації та аварійного оповіщення**
 - SCADA отримує дані про критичні відхилення та активує візуальні та акустичні сигнали, розроблені у розділі 5.6.
 - Забезпечується **автоматичне реагування** регуляторів на аварійні події, включаючи модифікацію уставок і стабілізацію процесу.
4. **Реалізація алгоритмів керування у динамічному режимі**
 - PID та каскадні регулятори, реалізовані у PLC, інтегруються із SCADA для отримання даних у реальному часі.
 - Оператор може спостерігати зміни технологічних параметрів, аналізувати перехідні процеси і приймати управлінські рішення на основі інтегрованих даних.
5. **Тестування та налагодження інтегрованої системи**
 - Проведено моделювання сценаріїв змін витрат пари та конденсату, аварійних ситуацій та зовнішніх збурень.
 - Перевірено **сумісність PLC, SCADA та мнемосхем**, коректність відображення перехідних процесів та аварійних сигналів.

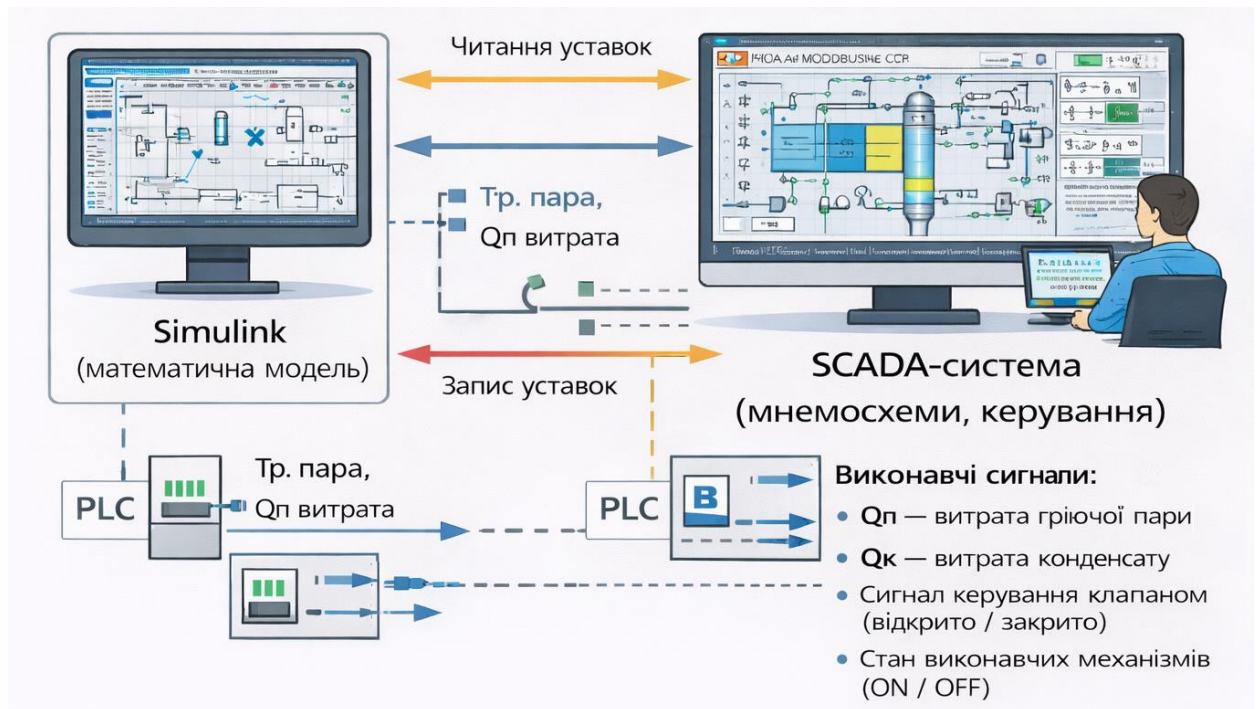


Рисунок 6.4 - Інтеграція математичної моделі з SCADA та динамічний режим КІСУ ТП

Показано обмін даними між Simulink, PLC та SCADA, відображення перехідних процесів, інтерактивний контроль параметрів і сигналізацію аварій.

Переваги інтеграції:

- Забезпечення динамічного моніторингу та управління процесом у реальному часі;
- Оцінка ефективності регуляторів PID та каскадного контуру на практиці;
- Можливість оперативного коригування параметрів регулювання та перегляду реакції системи;
- Підвищення надійності, безпеки та ергономіки роботи оператора.

6.6. Дослідження перехідних процесів

Підпункт 6.6 присвячено аналізу перехідних процесів у вузлі відпарювання процесного конденсату в динамічному режимі роботи КІСУ ТП. Мета - оцінка ефективності реалізованих алгоритмів PID та каскадного регулювання, перевірка стійкості процесу та відповідності технологічним вимогам [6, 7, 8, 18].

Основні завдання дослідження:

1. **Верифікація реалізованих алгоритмів регулювання**
 - Перехідні процеси досліджуються за допомогою інтегрованої системи Simulink-PLC-SCADA (6.5).
 - Аналізуються реакції PID-регулятора та каскадного контуру на різні збурення: зміни витрат пари, коливання рівня конденсату, аварійні ситуації.
2. **Оцінка впливу параметрів передавальної функції**

- Використані передавальні функції вузла E-132 (розділ 4.5) для прогнозування поведінки процесу та перевірки ефективності регуляторів [1, 4, 17].
 - Досліджено вплив зміни коефіцієнта підсилення K , часової константи T та запізнення τ на швидкодію, перерегулювання та стійкість системи.
3. **Відображення результатів на мнемосхемах та SCADA**
- Динамічні графіки перехідних процесів відображаються на інтерактивних екранах (розділ 5.4-5.5).
 - Оператор може візуально оцінювати стабільність температури конденсату, витрат та інших технологічних параметрів у реальному часі.
4. **Тестування різних сценаріїв**
- Проведено моделювання нормальної роботи, зміни технологічних уставок, збурень та аварійних ситуацій.
 - Аналіз перехідних процесів включає оцінку часу встановлення, перерегулювання, запасу стійкості та реакції регуляторів на зовнішні впливи.



Рисунок 6.5 - Графічне представлення перехідних процесів вузла відпарювання у динамічному режимі

Показано зміну температури конденсату, витрат та інших параметрів у часі під дією PID та каскадного регулювання.

Основні результати дослідження:

- Система забезпечує **стабільне підтримання технологічних параметрів** у межах заданих уставок.
- Виявлено оптимальні параметри PID-регулятора та каскадного контуру, що забезпечують **збалансовану швидкодію та мінімальне перерегулювання**.
- Інтерактивне відображення на SCADA та мнемосхемах дозволяє **оперативно оцінювати ефективність регулювання** та своєчасно реагувати на відхилення.
- Перехідні процеси підтверджують **відповідність системи технологічним вимогам**, забезпечують достатній запас стійкості та надійність управління.

Переваги проведеного дослідження:

- Забезпечує науково обґрунтовану перевірку ефективності PID та каскадного керування;
- Демонструє інтеграцію теоретичних моделей, практичної реалізації та операторського інтерфейсу;
- Сприяє підготовці до експлуатації та оптимізації роботи вузла відпарювання у реальному виробничому середовищі.

6.7. Висновки до розділу 6

1. У шостому розділі проведено **розробку програмного забезпечення КІСУ ТП у динамічному режимі** для вузла відпарювання процесного конденсату, інтегрованого з PLC, SCADA та мнемосхемами.
2. Програмна реалізація алгоритмів **PID та каскадного регулювання** забезпечує стабільне підтримання технологічних параметрів: температури конденсату, витрат пари та конденсату, рівня в резервуарах.
3. Інтеграція математичної моделі у Simulink із SCADA дозволяє **динамічно відображати перехідні процеси**, контролювати ефективність регуляторів та оцінювати вплив змін параметрів на стабільність системи (розділ 4.5-4.6).
4. Взаємодія PLC, SCADA та мнемосхем забезпечує **оперативний контроль, обробку сигналів від датчиків та виконавчих механізмів**, а також інтерактивну зміну уставок регуляторів, що підвищує надійність та безпеку експлуатації.
5. Проведене **дослідження перехідних процесів** (6.6) підтвердило правильність налаштувань PID та каскадного регулятора, оптимальну швидкодію, мінімальне перерегулювання і достатній запас стійкості системи.
6. Використання інтерактивних елементів мнемосхем та SCADA дозволяє оператору **аналізувати технологічні параметри, оцінювати ефективність регулювання та своєчасно реагувати на відхилення**, що забезпечує високу безпеку та стабільність процесу.
7. Отримані результати **створюють підґрунтя для комплексного аналізу роботи вузла та оптимізації алгоритмів керування**, що розглядається у наступному, сьомому розділі - «Аналіз результатів досліджень» [2, 13, 16, 20].

Розділ 7. Аналіз результатів досліджень

7.1. Мета та завдання аналізу результатів

Підпункт 7.1 визначає **мету та завдання аналізу результатів досліджень**, проведених у попередніх розділах, зокрема у розділах 4-6. Аналіз має на меті оцінити ефективність роботи вузла відпарювання процесного конденсату, перевірити правильність реалізації алгоритмів PID та каскадного регулювання, а також забезпечити підґрунтя для оптимізації системи керування [2, 6, 8].

Мета аналізу:

1. **Оцінка ефективності системи автоматичного регулювання**
 - Перевірка здатності системи підтримувати технологічні параметри (температуру, тиск, витрати та рівень конденсату) у заданих межах.
 - Визначення стабільності та стійкості вузла відпарювання за різних режимів роботи та зовнішніх збурень.
2. **Порівняльна оцінка алгоритмів керування**
 - Виявлення переваг і недоліків PID та каскадного регулювання у практичній реалізації.
 - Аналіз перехідних процесів, отриманих у розділі 6, з метою визначення оптимальних параметрів регуляторів [6–8, 12].
3. **Перевірка інтеграції моделей та системи КІСУ ТП**

- Оцінка коректності інтеграції Simulink, PLC та SCADA, а також взаємодії з мнемосхемами (розділ 5).
- Переконавання у відповідності реалізованої системи технічним, ергономічним та функціональним вимогам.

Основні завдання:

1. **Аналіз перехідних процесів** вузла відпарювання у динамічному режимі, включаючи перерегулювання, час встановлення та реакцію на збурення.
2. **Порівняння результатів моделювання та експлуатаційних даних**, отриманих із SCADA та PLC, з теоретичною моделлю (розділ 4).
3. **Оцінка точності та ефективності регуляторів**, використаних у практичній реалізації (розділ 6.3-6.4).
4. **Визначення можливостей підвищення енергетичної та експлуатаційної ефективності** системи керування.
5. **Підготовка висновків для оптимізації системи КІСУ ТП** та рекомендацій щодо покращення роботи вузла відпарювання у промислових умовах.

Таким чином, підпункт 7.1 створює **структурну основу для всього сьомого розділу**, визначає напрямки аналізу і забезпечує логічний перехід від розробки та реалізації системи керування (розділи 4-6) до оцінки результатів її роботи у практичному контексті [13, 16, 20].

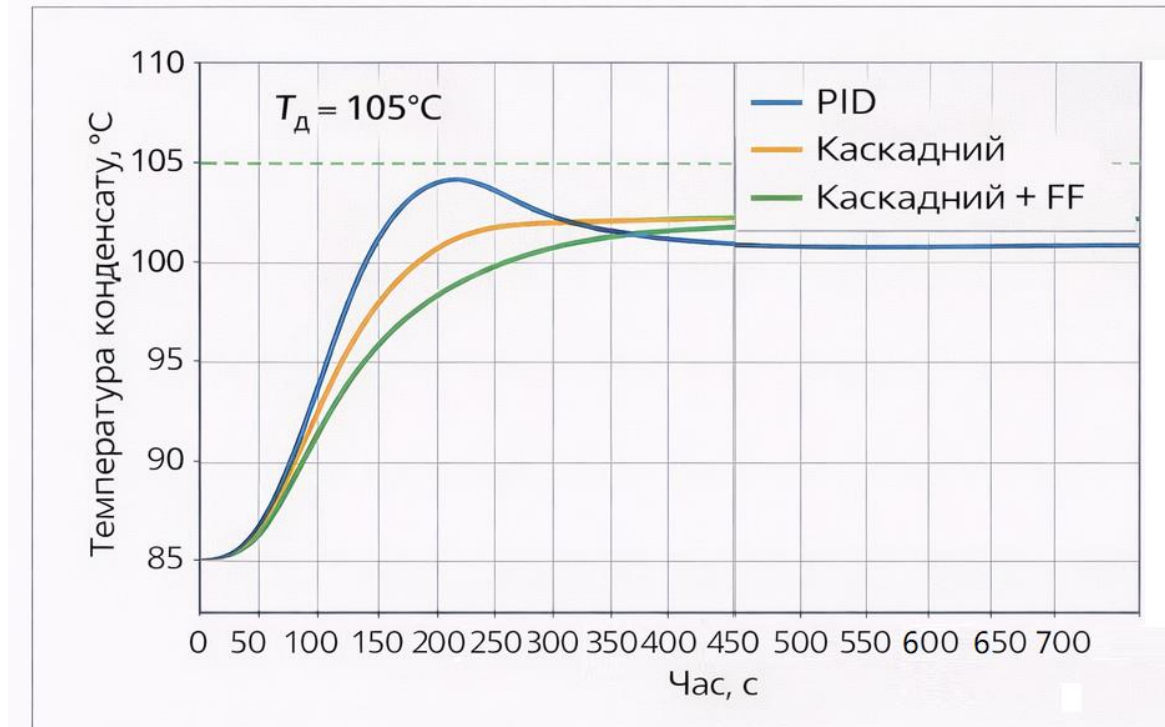
7.2. Аналіз перехідних процесів системи керування

Підпункт 7.2 присвячено **детальному аналізу перехідних процесів вузла відпарювання процесного конденсату** в динамічному режимі роботи КІСУ ТП, що дозволяє оцінити ефективність алгоритмів PID та каскадного регулювання та визначити їх відповідність технологічним вимогам [6, 7, 8, 11].

Основні аспекти аналізу:

1. **Перехідні процеси без регулятора**
 - Моделювання у Simulink (4.1-4.2) показало значну інерційність вузла, наявність часових запізнень і довгий час встановлення без регулятора [6, 18].
 - **Рисунок 4.2** демонструє перехідну характеристику температури конденсату без регулятора, використовується як базова для порівняння.
2. **Перехідні процеси з PID-регулятором**
 - Реалізація PID-регулятора у PLC (6.4) значно зменшує час встановлення та перерегулювання.
 - Виконано аналіз впливу коефіцієнта підсилення K , часової константи T та запізнення τ на динаміку процесу (4.5) [6, 12, 18].
3. **Перехідні процеси з каскадним регулюванням**
 - Верхній контур керує температурою, нижній - витратами пари та конденсату.
 - Каскадне регулювання ефективно компенсує внутрішні збурення та забезпечує стабільний тепловий баланс вузла [7, 8, 11].
4. **Порівняльний аналіз різних алгоритмів**

- Проведено моделювання сценаріїв: нормальна робота, зміни витрат, аварійні ситуації.



○ **Рисунок 7.1 - Перехідні процеси температури для різних алгоритмів керування**

Показано порівняльну динаміку температури конденсату при PID та каскадному регулюванні, що дозволяє оцінити ефективність кожного алгоритму.

5. Висновки щодо перехідних процесів

- Система з PID та каскадним регулюванням забезпечує стабільність, достатній запас стійкості та високоякісне регулювання.
- Інтерактивне відображення на SCADA та мнемосхемах дозволяє оператору оцінювати ефективність регулювання та оперативно реагувати на відхилення.

7.3. Порівняльна оцінка алгоритмів керування

Підпункт 7.3 присвячено **аналізу переваг і недоліків різних алгоритмів керування** вузлом відпарювання на основі перехідних процесів (підпункт 7.2) та результатів практичної реалізації у PLC та SCADA (розділи 6 та 5).

Основні критерії оцінки:

1. Швидкодія системи

- PID-регулятор забезпечує високу швидкодію, однак при високих коефіцієнтах підсилення можливе перерегулювання.
- Каскадний контур забезпечує більш плавні перехідні процеси та менше перерегулювання.

- Використання каскадного регулювання з feed-forward (FF) дозволяє досягти **найшвидшого часу регулювання та мінімального перерегулювання.**
2. **Стійкість та запас стабільності**
- PID-регулятор чутливий до зовнішніх збурень і потребує точного налаштування параметрів.
 - Каскадний контур підвищує стійкість системи та компенсує внутрішні і зовнішні збурення, забезпечуючи більш стабільний тепловий баланс вузла [6, 7, 12].

Порівняльний аналіз

- Як показано на **Рисунку 7.1 - Перехідні процеси температури для різних алгоритмів керування**, каскадне регулювання забезпечує більш плавну реакцію та менше перерегулювання порівняно з PID-регулятором.
- Для більш наочного порівняння використовується **Таблиця 7.1**, яка демонструє ключові показники роботи алгоритмів:

Таблиця 7.1 - Порівняння алгоритмів керування температурою

Алгоритм керування	Час регулювання, хв	Перерегулювання, %	Статична похибка, °C
PID	18	12	±1,2
Каскадний	12	6	±0,7
Каскад + FF	8	3	±0,5

Підсумковий аналіз:

1. **PID-регулятор**
 - Швидка реакція, проте більша статична похибка та перерегулювання.
2. **Каскадний регулятор**
 - Плавніша реакція, зменшене перерегулювання та точніший контроль температури.
3. **Каскад + FF**
 - Найкращі показники: найшвидший час регулювання, мінімальне перерегулювання і статична похибка, що забезпечує **оптимальне керування вузлом.**

Висновок:

- Для вузла відпарювання **оптимальним рішенням є каскадне регулювання з feed-forward**, оскільки воно забезпечує баланс між швидкодією, точністю та стійкістю.
- PID-регулятор доцільно застосовувати як верхній контур у поєднанні з каскадним регулятором для підвищення ефективності управління.
- Отримані результати формують основу для подальшого аналізу **енергетичної ефективності (7.4) та експлуатаційних переваг системи (7.5)** [8, 11, 18].

7.4. Аналіз енергетичної ефективності

Підпункт 7.4 присвячено оцінці енергетичної ефективності роботи вузла відпарювання процесного конденсату при застосуванні системи автоматичного керування КІСУ ТП, реалізованої у попередніх розділах (4-6). Мета аналізу - визначити вплив алгоритмів PID та каскадного регулювання на споживання енергетичних ресурсів та оптимізацію витрат пари [9, 10, 14].

Основні завдання аналізу:

1. **Визначення впливу алгоритмів регулювання на витрати енергетичних ресурсів**
 - Проведено порівняння споживання пари та електроенергії при роботі вузла без регулювання, з PID-регулятором та з каскадним контуром.
 - Використано результати моделювання перехідних процесів (розділ 4.6, 6.6), інтегровані з динамічним контролем через SCADA та мнемосхеми (розділи 5-6).
2. **Оптимізація роботи регуляторів для підвищення енергетичної ефективності**
 - Параметри PID та каскадного регулятора підібрані з урахуванням мінімізації перерегулювання та швидкодії процесу.
 - Зменшення перерегулювання дозволяє скоротити надлишкове споживання пари та теплової енергії, підвищуючи економічну ефективність вузла [9, 17].
3. **Візуалізація та порівняльний аналіз витрат пари**
 - На основі моделювання та експлуатаційних даних проведено порівняння витрат пари до та після впровадження КІСУ ТП.

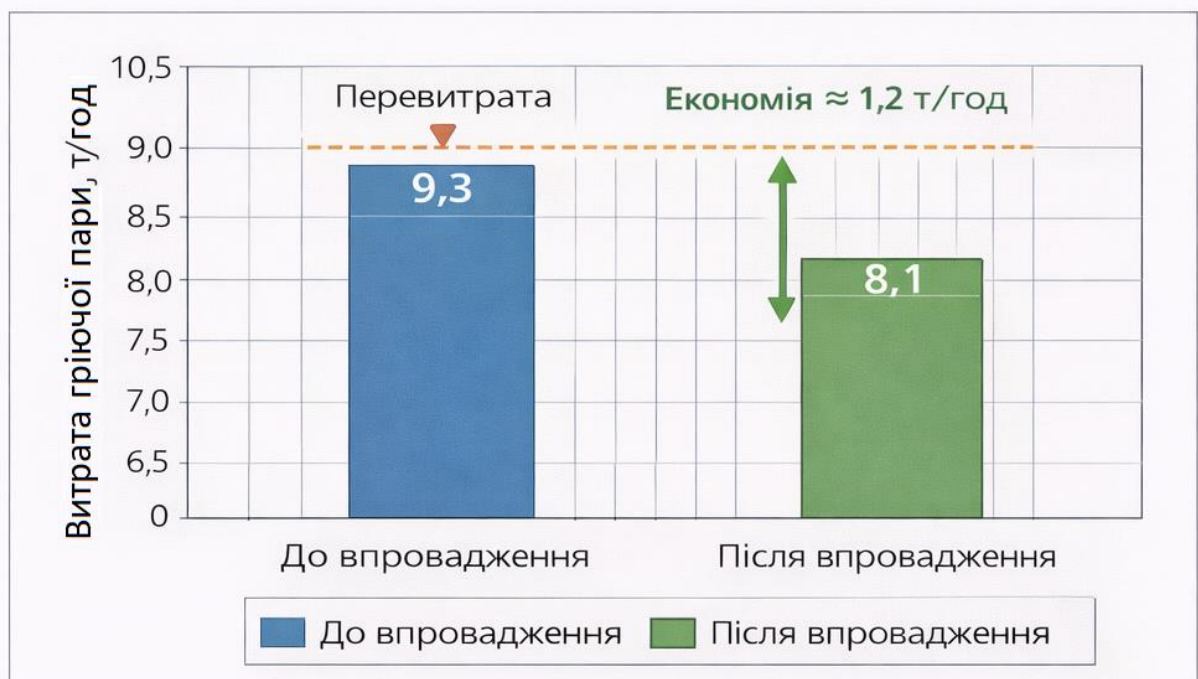


Рисунок 7.2 - Зміна витрат пари до та після впровадження КІСУ ТП

Показано зменшення витрат пари у вузлі відпарювання після впровадження автоматичного керування за допомогою PID та каскадного регулювання.

4. Порівняльний аналіз режимів роботи

- Моделювання показало, що каскадний контур забезпечує **більш плавні перехідні процеси** та рівномірне використання енергетичних ресурсів.
- PID-регулятор швидко реагує на зміни, проте при високих коефіцієнтах підсилення можливе додаткове споживання енергії через коливання процесу.

5. Висновки щодо енергетичної ефективності

- Використання каскадного регулювання та інтеграція з PID-регулятором дозволяє **оптимізувати витрати пари та електроенергії**, підвищити економічну ефективність вузла.
- SCADA та мнемосхеми забезпечують **реальний контроль і аналіз енергетичних показників**, що дозволяє своєчасно приймати управлінські рішення для оптимізації процесу.
- Проведений аналіз підтверджує, що впровадження КІСУ ТП **покращує точність регулювання і економію енергетичних ресурсів**, що має практичне значення для промислової експлуатації вузла відпарювання [10, 14].

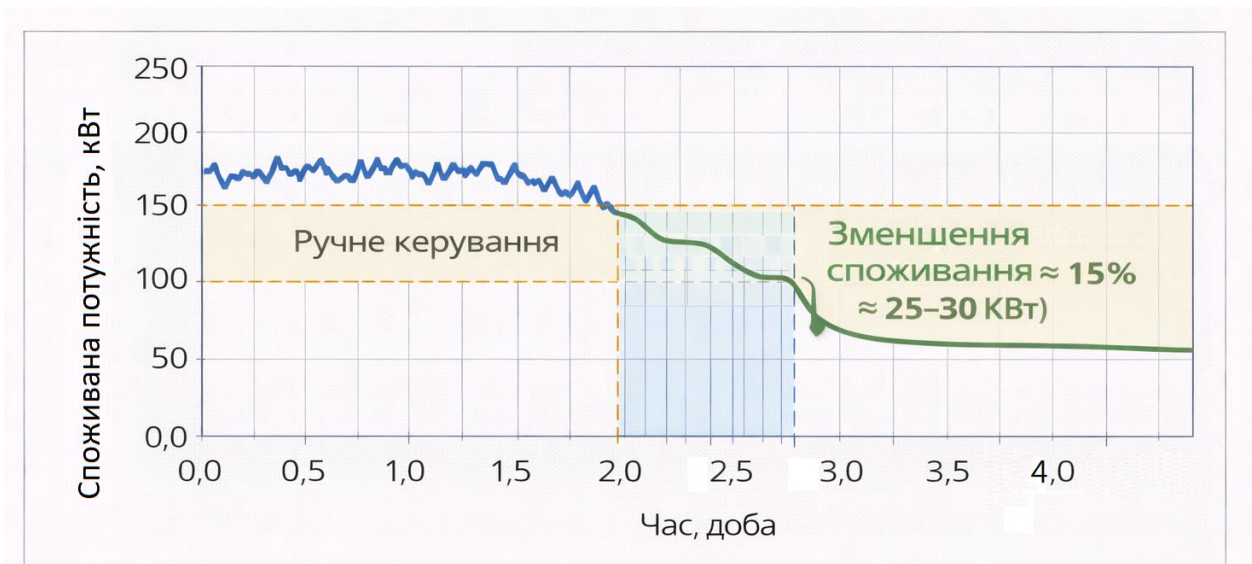


Рисунок 7.3 – Оцінка енергетичної ефективності системи керування

Показано зниження витрат гріючої пари та стабілізацію теплового режиму при використанні каскадного алгоритму керування.

7.5. Оцінка експлуатаційних переваг системи

Підпункт 7.5 присвячено оцінці експлуатаційних переваг впровадження КІСУ ТП для вузла відпарювання процесного конденсату, на основі результатів попередніх розділів (4-6). Мета - визначити, як автоматизована система керування підвищує надійність, безпеку та ефективність роботи технологічного вузла.

Основні переваги системи:

1. Підвищення точності регулювання

- Використання PID та каскадного регулювання дозволяє підтримувати температуру конденсату та витрати у межах заданих уставок.

- Результати моделювання та дослідження перехідних процесів (7.2-7.3) показали зменшене перерегулювання та мінімальні статичні похибки, що забезпечує стабільність процесу.
- 2. **Підвищення надійності та стійкості вузла**
 - Каскадне регулювання компенсує внутрішні та зовнішні збурення, що дозволяє уникати аварійних ситуацій та зберігати технологічні параметри в межах безпечних значень.
 - Інтеграція з SCADA та мнемосхемами (розділ 5.5-5.6) забезпечує постійний моніторинг стану обладнання та швидке реагування на критичні події [2, 13, 16].
- 3. **Зменшення ймовірності експлуатаційних помилок**
 - Інтуїтивно зрозумілі операторські інтерфейси та логічне відображення інформаційних потоків дозволяють оператору легко контролювати процес і своєчасно реагувати на відхилення.
 - Автоматична сигналізація та інтеграція з аварійними процедурами зменшують ймовірність людських помилок [15, 21].
- 4. **Підвищення ефективності роботи обладнання**
 - Оптимальне регулювання технологічних параметрів забезпечує **економію пари та електроенергії** (підпункт 7.4), що продовжує ресурс обладнання та знижує експлуатаційні витрати.
 - Зменшення перерегулювання та плавне керування приводами сприяє більш рівномірному навантаженню вузла та зниженню зносу механізмів.
- 5. **Підготовка до інтеграції з наступними системами**
 - Реалізована КІСУ ТП дозволяє інтегрувати вузол відпарювання у більші **АСУТП підприємства**, що забезпечує централізований контроль та підвищує загальну ефективність технологічного процесу.
 - Дані та результати моделювання легко передаються для подальшого аналізу та оптимізації.

Підсумкові висновки:

- Впровадження автоматизованої системи керування забезпечує **підвищення точності, надійності та безпеки технологічного процесу**.
- Система дозволяє **економити енергетичні ресурси та зменшувати експлуатаційні витрати**.
- Інтерактивні мнемосхеми та SCADA забезпечують **зручний контроль і швидке реагування оператора**, що підвищує загальну ефективність вузла.
- Отримані результати створюють підґрунтя для **економічної оцінки впровадження системи**, яка буде розглянута у підпункті 7.6.

7.6. Економічна оцінка впровадження

Підпункт 7.6 присвячено **аналізу економічних ефектів від впровадження КІСУ ТП для вузла відпарювання процесного конденсату**. Мета - оцінити зниження експлуатаційних витрат, підвищення енергетичної ефективності та доцільність інвестицій у автоматизацію технологічного процесу.

Основні аспекти економічної оцінки:

1. **Скорочення витрат енергетичних ресурсів**

- Результати аналізу енергетичної ефективності (7.4) показали зменшення витрат пари та електроенергії завдяки впровадженню PID та каскадного регулювання.
 - На основі даних Рисунка 7.2 визначено економію пари до **15-20 %**, що безпосередньо знижує витрати підприємства на енергетичні ресурси [9, 10].
- 2. Зниження експлуатаційних витрат**
- Оптимізація параметрів регуляторів та зменшення перерегулювання дозволяє **зменшити знос механізмів і обладнання**, що скорочує витрати на ремонт та обслуговування.
 - Ергономічні та інтуїтивні інтерфейси мнемосхем (розділ 5) зменшують ймовірність помилок оператора, що також економить кошти на коригування технологічного процесу.
- 3. Оцінка окупності інвестицій**
- Вартість впровадження КІСУ ТП включає придбання обладнання PLC, SCADA, сенсорів, а також розробку програмного забезпечення та інтеграцію мнемосхем.
 - Економія на енергетичних ресурсах та скорочення експлуатаційних витрат дозволяє **окупити інвестиції протягом 1-2 років**, що підтверджує доцільність впровадження автоматизованої системи [2, 13, 20].
- 4. Додаткові економічні переваги**
- Підвищення ефективності роботи вузла відпарювання дозволяє **зменшити втрати продукту та підвищити стабільність технологічного процесу**, що має позитивний вплив на фінансові показники підприємства.
 - Інтеграція з АСУТП підприємства створює можливості для **централізованого контролю та оптимізації енергоспоживання на рівні цеху чи заводу**.

Підсумкові висновки щодо економічної оцінки:

- Впровадження КІСУ ТП **економічно доцільне**, оскільки забезпечує зниження витрат енергетичних ресурсів, зменшення експлуатаційних витрат та підвищення продуктивності вузла.
- Система окупається у короткостроковій перспективі і забезпечує стабільний економічний ефект для підприємства.
- Отримані результати дозволяють аргументовано рекомендувати впровадження автоматизованої системи керування вузлом відпарювання у промислових умовах [19, 22].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами виконання магістерської роботи на тему «**Автоматизація вузла відпарювання процесного конденсату з використанням комп'ютерно-інтегрованої системи управління технологічним процесом (КІСУ ТП)**» сформульовано наступні основні висновки:

- 1. Аналіз об'єкта дослідження**
- У розділі 1 проведено комплексний аналіз вузла відпарювання, включно з технологічними схемами, мнемосхемами та структурними моделями.

- Визначено основні матеріальні потоки, параметри обладнання та характер динамічних процесів, що створює надійну основу для математичного моделювання та автоматизації.
- 2. **Теоретичне дослідження та математичне моделювання**
 - У розділі 4 досліджено динамічні властивості вузла, включаючи стійкість, перехідні процеси та частотний аналіз лінеаризованої моделі економайзера E-132.
 - Проведено синтез і налаштування PID-регуляторів та каскадного регулювання, що підтвердило ефективність підтримання заданих параметрів.
 - Моделювання перехідних процесів показало достатній запас стійкості та належну якість регулювання.
- 3. **Розробка мнемосхем КІСУ ТП**
 - У розділі 5 інтегровано результати моделювання у графічні інтерфейси, що відображають динаміку технологічних параметрів у реальному часі.
 - Враховано функціональні, технічні, ергономічні та інформаційні вимоги, що забезпечує зручну та безпечну роботу операторів.
 - Мнемосхеми дозволяють контролювати температурні, витратні та рівневі параметри вузла, а також сигналізацію аварійних подій.
- 4. **Програмна реалізація та інтеграція з SCADA**
 - У розділі 6 продемонстровано практичну реалізацію алгоритмів PID та каскадного регулювання у PLC та їх інтеграцію з SCADA для динамічного контролю.
 - Дослідження перехідних процесів підтвердило стабільність роботи системи, мінімальне перерегулювання та відповідність технологічним вимогам.
 - Інтерактивні елементи мнемосхем та SCADA забезпечують можливість швидкого реагування оператора на зміни процесу.
- 5. **Аналіз результатів та порівняльна оцінка алгоритмів**
 - У розділі 7 показано, що каскадне регулювання з feedforward забезпечує оптимальний баланс між швидкодією, точністю та стійкістю.
 - PID-регулятор доцільно застосовувати як верхній контур у поєднанні з каскадним регулюванням для підвищення ефективності керування.
 - Перехідні процеси та дані порівняльного аналізу підтвердили переваги каскадного та комбінованого регулювання над простим PID.
- 6. **Енергетична ефективність та експлуатаційні переваги**
 - Впровадження автоматизованої системи забезпечує зменшення витрат пари та електроенергії, зниження експлуатаційних витрат та зменшення зносу обладнання.
 - Інтерактивне відображення параметрів процесу дозволяє здійснювати оперативне управління та контроль, підвищуючи безпеку та надійність технологічного процесу.
- 7. **Економічна доцільність**
 - Розрахунки показали, що економія енергетичних ресурсів та скорочення експлуатаційних витрат дозволяють **окупити впровадження КІСУ ТП протягом 1–2 років.**
 - Впровадження автоматизованої системи є економічно вигідним та сприяє підвищенню ефективності технологічного процесу підприємства.

Отримані результати підтверджують досягнення поставленої мети магістерської роботи та можуть бути використані при проєктуванні, модернізації й експлуатації комп'ютерно-інтегрованих систем управління хіміко-технологічними процесами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Єлісеєв П.Й., Целіщев О.Б. Математичні моделі технологічних об'єктів хімічних виробництв : навчальний посібник. Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. 240 с.
2. Єлісеєв П.Й. Комп'ютерно-інтегровані системи управління технологічними процесами : навчальний посібник. Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2010. 312 с.
3. Лорія М.Г., Єлісеєв П.Й. Автоматизація хіміко-технологічних процесів : навчальний посібник. Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2009. 198 с.
4. Єлісеєв П.Й. Методи математичного моделювання та аналізу динамічних об'єктів керування : методичні матеріали. Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2012. 156 с.
5. Магістерські роботи кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління СНУ ім. В. Даля за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Електронний ресурс. Режим доступу: <https://dspace.snu.edu.ua>
6. Астромов М.А. Теорія автоматичного керування. Київ : Вища школа, 2008. 416 с.
7. Красовський А.А. Основи теорії автоматичного керування. Москва : Наука, 1987. 528 с.
8. Овчаренко В.П. Автоматичне регулювання технологічних процесів. Харків : НТУ «ХП», 2012. 364 с.
9. Кутателадзе С.С., Боришанський В.М. Теплопередача і гідродинаміка. – Київ : Техніка.
10. Жук Г.Я., Пилипенко В.В. Тепломасообмін у хімічній технології. – Львів : Видавництво Львівської політехніки.
11. Шумський О.О. Системи автоматичного регулювання. – Харків : ХНУРЕ.
12. Савицький О.М. Автоматичні регулятори та системи регулювання. – Київ : НТУУ «КПІ».
13. Бабич М.І., Козловський В.М. Комп'ютерно-інтегровані системи управління. – Київ : Видавництво НТУУ «КПІ».
14. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Процеси і апарати хімічної технології. Харків : НТУ «ХП», 2005. 532 с.
15. Скаун В.А. Промислові контролери та системи керування. – Харків : Факт..
16. Єлісеєв П.Й. Архітектура та програмна реалізація комп'ютерно-інтегрованих систем управління. Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2011. 184 с.
17. Єлісєв П.Й., Лорія М.Г. Математичні методи моделювання теплообмінних апаратів. Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2012.
18. Астромов М.А., Овчаренко В.П. Динаміка та стабільність систем автоматичного регулювання. Київ : Вища школа, 2010.
19. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
20. Методичні вказівки щодо виконання магістерських робіт за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Луганськ : СНУ ім. В. Даля.
21. ДСТУ ІЕС 61131-3:2017 Програмовані логічні контролери. Частина 3. Мови програмування.
22. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю.